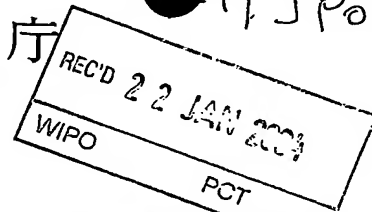


Rec'd PCT/PTO 24 JUN 2005
PCT/JP03/16725

25.12.03

T/JP03/16725

日本国特許庁
JAPAN PATENT OFFICE



[Handwritten signature]

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出願年月日
Date of Application: 2002年12月26日

出願番号
Application Number: 特願2002-378514
[ST. 10/C]: [JP2002-378514]

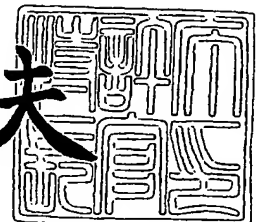
出願人
Applicant(s): 日本電信電話株式会社

PRIORITY DOCUMENT
SUBMITTED OR TRANSMITTED IN
COMPLIANCE WITH
RULE 17.1(a) OR (b)

2003年11月21日

特許庁長官
Commissioner,
Japan Patent Office

今井康夫



【書類名】 特許願
【整理番号】 NTTH146461
【提出日】 平成14年12月26日
【あて先】 特許庁長官 殿
【国際特許分類】 H04B 10/12
【発明の名称】 光回路およびその製造方法
【請求項の数】 16

【発明者】

【住所又は居所】 東京都千代田区大手町二丁目 3 番 1 号 日本電信電話株式会社内

【氏名】 橋本 俊和

【発明者】

【住所又は居所】 東京都千代田区大手町二丁目 3 番 1 号 日本電信電話株式会社内

【氏名】 小川 育生

【発明者】

【住所又は居所】 東京都千代田区大手町二丁目 3 番 1 号 日本電信電話株式会社内

【氏名】 大山 貴晴

【発明者】

【住所又は居所】 東京都千代田区大手町二丁目 3 番 1 号 日本電信電話株式会社内

【氏名】 北川 毅

【特許出願人】

【識別番号】 000004226

【氏名又は名称】 日本電信電話株式会社

【代理人】

【識別番号】 100077481

【弁理士】

【氏名又は名称】 谷 義一

【選任した代理人】

【識別番号】 100088915

【弁理士】

【氏名又は名称】 阿部 和夫

【手数料の表示】

【予納台帳番号】 013424

【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】

【物件名】 明細書 1

【物件名】 図面 1

【物件名】 要約書 1

【包括委任状番号】 9701393

【プルーフの要否】 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 光回路およびその製造方法

【特許請求の範囲】

【請求項 1】 誘電体からなり、入力ポートと 1 又は複数の出力ポートとを有し、光信号を制御し、前記入力ポートからの入射光を所望の前記出力ポートに出射させる際に、屈折率分布により、前記入力ポートからの入射光を回折しつつ、複数回の散乱による干渉を用いることを特徴とする光回路。

【請求項 2】 請求項 1 に記載の光回路において、前記光回路を基板上に 2 次元的に配置することを特徴とする光回路。

【請求項 3】 請求項 2 に記載の光回路において、前記屈折率分布を平面光波回路状とし、該屈折率分布の形状として、基板に対して垂直方向に閉じ込め構造を有することを特徴とする光回路。

【請求項 4】 請求項 2 又は 3 に記載の光回路において、複数の組の前記屈折率分布を電気光効果により基板上に必要な応じて生じさせたことを特徴とする光回路。

【請求項 5】 請求項 1 乃至 4 のいずれかに記載の光回路を製造するための光回路の製造方法であって、

前記入力ポートからの入射光の入力フィールドのフィールド分布 1 と、前記入力ポートからの入射光の光信号が期待される前記出力ポートからの出力フィールドを該出力ポート側から逆に伝搬させた光のフィールド分布 2 とを求める第 1 のステップと、

当該求めた前記フィールド分布 1 と前記フィールド分布 2 とをもとに、前記フィールド分布 1 と前記フィールド分布 2 との各点における位相差を減少させるように、前記屈折率分布を配置する第 2 のステップと、

前記入力フィールドの伝搬後の出力と前記出力フィールドとが、所望の誤差以下となるまで、前記第 1 のステップと前記第 2 のステップとを繰り返す第 3 のス

テップと

を備えたことを特徴とする光回路の製造方法。

【請求項 6】 請求項 5 に記載の光回路の製造方法において、
前記屈折率分布を得るために、各点の前記屈折率分布を変数として最急降下法により得られる方向に屈折率を変化させる
ことを特徴とする光回路の製造方法。

【請求項 7】 請求項 5 に記載の光回路の製造方法において、
前記第 1 のステップに替えて第 4 のステップを備え、前記第 2 のステップに替えて第 5 のステップを備え、
前記第 4 のステップは、
前記屈折率分布を用いて、前記フィールド分布 2 を求める第 6 のステップと、
当該求めたフィールド分布 2 と、該フィールド分布 2 を求めた位置を前記出力ポートの出射面から前記入力ポートの入射面に向けて所定量だけ変位させた第 1 の位置における、前記フィールド分布 1 とをもとに、前記フィールド分布 2 と前記フィールド分布 1 との前記第 1 の位置における位相を整合させるように、前記屈折率分布を配置する第 7 のステップと、

前記フィールド分布 2 を求めた位置が前記入射面に達するまで、前記第 6 のステップと前記第 7 のステップとを繰り返す第 8 のステップとを有し、

前記第 5 のステップは、
前記屈折率分布を用いて、前記フィールド分布 1 を求める第 9 のステップと、
当該求めたフィールド分布 1 と、該フィールド分布 1 を求めた位置を前記入射面から前記出射面に向けて所定量だけ変位させた第 2 の位置における、前記フィールド分布 2 とをもとに、前記フィールド分布 1 と前記フィールド分布 2 との前記第 2 の位置における位相を整合させるように、前記屈折率分布を配置する第 10 のステップと、

前記フィールド分布 1 を求めた位置が前記出射面に達するまで、前記第 9 のステップと前記第 10 のステップとを繰り返す第 11 のステップとを有する
ことを特徴とする光回路の製造方法。

【請求項 8】 請求項 5 乃至 7 のいずれかに記載の光回路の製造方法におい

て、

前記屈折率分布は屈折率の値として上限および有限個の段差を有し、該屈折率の値を制限値とする

ことを特徴とする光回路の製造方法。

【請求項 9】 請求項 5 乃至 8 のいずれかに記載の光回路の製造方法において、

光信号として制御すべき性質として、波長、偏光、位相を前記入力光のパラメータとして与え、該パラメータに対応して前記出力フィールドを指定することにより、波長、偏光、位相に依存した前記出力フィールドを制御する前記光回路を構成し、前記位相は前記出力フィールドと前記入力フィールドとの相対的な位相関係を意味する

ことを特徴とする光回路の製造方法。

【請求項 10】 請求項 9 に記載の光回路の製造方法において、

前記入力ポートに波長多重された入射光が入射されるように設定し、複数の前記出力ポートのそれぞれに異なる波長をもつ光を出射させるように設定することを特徴とする光回路の製造方法。

【請求項 11】 請求項 9 に記載の光回路の製造方法において、

前記入力ポートに偏波多重された入射光が入射されるように設定し、前記 1 又は複数の出力ポートを同一の出力ポートとして前記屈折率分布を調整することを特徴とする光回路の製造方法。

【請求項 12】 請求項 9 に記載の光回路の製造方法において、

前記入力ポートに波長多重された入射光が入射されるように設定し、前記 1 又は複数の出力ポートを同一の出力ポートとして各波長においてその位相を調整し、所望の分散特性を実現する

ことを特徴とする光回路の製造方法。

【請求項 13】 請求項 9 に記載の光回路の製造方法において、

前記入力ポートに偏波多重された入射光が入射されるように設定し、複数の前記出力ポートのそれぞれに異なる偏波をもつ光を出射させるように設定することを特徴とする光回路の製造方法。

【請求項 14】 請求項 9 に記載の光回路の製造方法において、前記入力ポートへの入射光を、複数の前記出力ポートに分配するように設定する

ことを特徴とする光回路の製造方法。

【請求項 15】 請求項 6 又は 7 に記載の光回路の製造方法において、前記屈折率分布の初期値としてランダムな分布を用いることを特徴とする光回路の製造方法。

【請求項 16】 請求項 12 に記載の光回路の製造方法において、前記出力ポートが複数あり平面波的なフィールドを出力とする場合に、隣接する前記出力ポート間の位相を異なる位相に設定することを特徴とする光回路の製造方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、光回路およびその製造方法に関し、より詳しくは、光通信および光信号処理等に用い、高密度に集積可能な光回路の設計とそれによる光部品の設計に適用される光回路およびその製造方法に関する。

【0002】

【従来の技術】

光通信などでは、光の分岐、干渉を容易に実現できる光回路として、光導波路構造を用いた集積光部品が開発されてきた。これによれば、光導波路長等を調整し、光干渉計等を容易に作製でき、また、半導体回路の加工技術が適用可能であるため、光部品の集積化が可能であった。

【0003】

しかしながら、このような光導波路回路においては、屈折率分布による閉じ込め構造により光回路の要素を構成するために、一種の光配線による縦列的な処理を必要とするため光回路の干渉等から考えられる必要な光路長よりも非常に大きくなるという問題があった。たとえば、典型的なアレイ導波路格子を例にとると、入力ポートから、光の分波のためのスラブ導波路を有するスターカップラ、アレ

イ導波路再びスターカプラにより光が合波される。入力ポートには複数の波長 (λ_j) が入射され、出力ポートに光が分波して出力されるが、波長の千分の1程度の分解能を得るために、波長の数万倍の光路長を必要としている（例えば、非特許文献1参照）。この非特許文献1によれば、さらに、光導波路回路においては、偏光に依存する回路特性を補正するために、光回路の導波路パターンだけでなく、波長板などの加工を施す必要があると述べられている。

【0004】

また、光回路を小型化するためには、光を光導波路中に強く閉じ込める必要があるために、たとえば、ステップインデクスの光導波路では従来0.1%よりも大きい比屈折率差が用いられてきた。このため、屈折率分布により光を制御するためには、大きな屈折率差を必要とするため、回路構成が限られるという問題があった。とくに、屈折率差の変化量は紫外線照射や熱光学効果などでは高々0.1%程度である場合が多く、光導波路の光路にそって長い距離に亘って変化を加えて光回路を構成する必要があった。

【0005】

【非特許文献1】

Y. Hibino, "Passive optical devices for photonic networks,"
IEIC Trans. Commun, Vol.E83-B No.10, 2000

【0006】

【発明が解決しようとする課題】

従来のシステムには上述したような種々の問題があり、従来の光導波路回路を用いた光回路よりも十分小型で、あるいは屈折率分布において弱い屈折率の高低差でも十分な光信号の制御を可能とする光回路、及びその光回路を実現可能な設計方法が必要とされているという点において、上述した従来技術には未だ改善の余地が残っている。

【0007】

本発明は、このような課題に鑑みてなされたもので、その目的とするところは、小型で効率よく光信号を制御できる光回路およびその製造方法を提供することにある。

【0008】

【課題を解決するための手段】

このような目的を達成するために、本発明の光回路は、誘電体からなり、入力ポートと1又は複数の出力ポートとを有し、光信号を制御し、前記入力ポートからの入射光を所望の前記出力ポートに出射させる際に、屈折率分布により、前記入力ポートからの入射光を回折しつつ、複数回の散乱による干渉を用いることを特徴とする（実施形態1～7、図1、3、4、5、7、9、11、13、14、16に対応）。

【0009】

従来の、光導波路回路では導波路中の光の伝搬の位相差等を用いフィルタ特性を実現するのに対し、上記手段による光回路は光の回折と散乱と伝搬を利用して、光導波路構造は光の導波路中への閉じ込めにより伝搬方向には大きな伝搬定数があり、それらを干渉させることで、フィルタ回路等を実現するが、合分波を考えたとき、伝搬方向と垂直方向に光の性質により光信号分離することが回路の本質であるから、伝搬方向と垂直方向にも、同様の干渉効果を用いる必要があるため、不必要に回路が長くなる。

【0010】

しかし、上記構成の光回路であれば、（a）伝搬と同時に光を回折させ、（b）多数回の散乱により干渉より光を干渉させる。これにより、（ア）複数の点からの干渉が得られる、（イ）多数の干渉が得られる、ため、光回路が小型化される。これは、一般に、伝搬方向の位相の変化は横方向よりも激しいので、横方向の干渉に必要な伝搬距離程度で光回路を実現することが可能となるからである。あるいは、（ア'）散乱点を複数の点に分散できるので弱い散乱でも良い、ため、光回路の屈折率分布の高低の差が小さい場合でも光の合分波が容易に実現される。

【0011】

また、前記光回路を基板上に2次元的に配置することを特徴とすることができる（実施形態1～7、図1、3、4、5、7、9、11、13、14、16に対応）。

【0012】

この構成により、上記光回路を実現するにあたっては、平面光波回路を用いることにより、屈折率分布として計算すべき領域を面内方向のみとして計算量を縮減し、さらに、微細加工を半導体加工技術等におけるウエハプロセスにより実現可能な容易なものとした。

【0013】

さらに、光回路形成においては、各点における屈折率が互いに影響しあう多体系として統計力学的な性質を示すと考えられる。特に、統計力学でよく知られているように次元性に依存した性質が現れると考えられ、この特徴に着目して上述の構成を考えた。

【0014】

1次元の場合、すなわち、光導波路にグレーティングを作製したような場合、光の散乱が散乱光の逃げ場がない（つまり、入力側と出力側しかない）ため、多重散乱の影響を強く受けるため、光回路の自由度が大きく制限されるとともに、所望の機能を実現するためには、弱い散乱で、かつ、均一性の屈折率分布が必要となる。この意味は、たとえば、ファイバグレーティングのように、均一性の高い周期性を基本にわずかに変更を加えた光部品に限られると言う意味である。3次元の場合、すなわち、ホログラムのような場合、光の散乱が散乱光の逃げ場が多すぎる（つまり、入力側と出力側しかないだけでなく、上下、左右方向に逃げる）ため、散乱光を強く制御して光を集光させる必要がある。このため、多重散乱を効率的に発生させ作用させるためには、強い屈折率の変化が必要となり、屈折率に制限がかかるとともに、強い屈折率変化のために、屈折率分布の形状に高い制御性が要求され作製が困難となる。

【0015】

当然ではあるが、3次元の場合は加工が複雑になり、設計の自由度も極端に大きくなり、設計が煩雑となる。このため通常は2次元面上に屈折率分布をもうけ、その面の法線方向から光を入射して、透過または反射波を自由空間に伝搬させる、多重散乱ではなく1重散乱のみを用いた光回路によりホログラムが設計されることとなる。

【0016】

それに対して、本発明の2次元の構成の場合は、適度な自由度があり、かつ、光回路の設計が容易となる。

【0017】

また、前記光回路を基板上に2次元的に配置し、前記屈折率分布を平面光波回路状とし、該屈折率分布の形状として、基板に対して垂直方向に閉じ込め構造を有することを特徴とすることができる（実施形態1、図5に対応）。

【0018】

この構成により、上記手段で設計した光回路を実現する上で、平面光波回路においても光回路の厚み方向に対して屈折率分布を設けることにより、光が放射しないように厚み方向に閉じ込め構造を設け光回路の損失を抑制した。

【0019】

ここで、上記光回路は、複数の組の前記屈折率分布を電気光効果により基板上に必要な応じて生じさせたことを特徴とすることができる（実施形態7、図16に対応）。

【0020】

また、上記目的を達成するために、本発明の光回路の製造方法は、上述の光回路を製造するための光回路の製造方法であって、前記入力ポートからの入射光の入力フィールドのフィールド分布1と、前記入力ポートからの入射光の光信号が期待される前記出力ポートからの出力フィールドを該出力ポート側から逆に伝搬させた光のフィールド分布2とを求める第1のステップと、当該求めた前記フィールド分布1と前記フィールド分布2とをもとに、前記フィールド分布1と前記フィールド分布2との各点における位相差を減少させるように、前記屈折率分布を配置する第2のステップと、前記入力フィールドの伝搬後の出力と前記出力フィールドとが、所望の誤差以下となるまで、前記第1のステップと前記第2のステップとを繰り返す第3のステップとを備えたことを特徴とする（実施形態1、図1～5に対応）。

【0021】

入力光の伝搬光と出力光の逆伝搬光との条件としてそのフィールドの位相整合

が重要であることに鑑み、上記構成をもとに光回路の屈折率分布を調整すれば、与えられた入力光に対して所望の出力光を見出すことが可能である。

【0022】

ここで、前記屈折率分布を得るために、各点の前記屈折率分布を変数として最急降下法により得られる方向に屈折率を変化させることを特徴とすることができる（実施形態1、図2に対応）。

【0023】

上記の屈折率を求めるためには、通常、各屈折率の変化ごとに光の伝搬を計算し、所望の出力フィールドに近づける必要があるが、上記構成によれば、伝搬方向に1回、逆伝搬方向に1回の計算により必要な変化の向きを与えることが可能である。すなわち、局所的な条件で屈折率を変化させ、これを繰り返せば極小条件に近づきうる。

【0024】

また、前記第1のステップに替えて第4のステップを備え、前記第2のステップに替えて第5のステップを備え、前記第4のステップは、前記屈折率分布を用いて、前記フィールド分布2を求める第6のステップと、当該求めたフィールド分布2と、該フィールド分布2を求めた位置を前記出力ポートの出射面から前記入力ポートの入射面に向けて所定量だけ変位させた第1の位置における、前記フィールド分布1とをともに、前記フィールド分布2と前記フィールド分布1との前記第1の位置における位相を整合させるように、前記屈折率分布を配置する第7のステップと、前記フィールド分布2を求めた位置が前記入射面に達するまで、前記第6のステップと前記第7のステップとを繰り返す第8のステップとを有し、前記第5のステップは、前記屈折率分布を用いて、前記フィールド分布1を求める第9のステップと、当該求めたフィールド分布1と、該フィールド分布1を求めた位置を前記入射面から前記出射面に向けて所定量だけ変位させた第2の位置における、前記フィールド分布2とをともに、前記フィールド分布1と前記フィールド分布2との前記第2の位置における位相を整合させるように、前記屈折率分布を配置する第10のステップと、前記フィールド分布1を求めた位置が前記出射面に達するまで、前記第9のステップと前記第10のステップとを繰り返す。

返す第11のステップとを有することを特徴とすることができる（実施形態2、図6に対応）。

【0025】

この構成により、さらに、より高速にかつ計算に必要とする記憶領域を少なく計算できる。この構成は、位相整合条件を交互に伝搬させたフィールド間の位相整合条件として利用し、計算回数および必要記憶領域を縮減している。これは、伝搬フィールドと逆伝搬フィールドの位相整合を各点で実行しながら、光の伝搬を計算するもので、片一方のフィールドをそれ以前の屈折率分布により計算したものとするので、計算が実現される。

【0026】

また、前記屈折率分布は屈折率の値として上限および有限個の段差を有し、該屈折率の値を制限値とすることを特徴とすることができる（実施形態1、図2に対応）。

【0027】

この構成により、特に、屈折率分布に制限がある場合でも、その制限に則る範囲で、屈折率を調整すればよい。これは、この設計方法を用いることで、各場所ごとに完全に調整しきれない場合でも、その後のステップで段階的に調整を行うことができるからである。それを用いれば、いわゆるステップインデックス型の光回路においても上記の設計方法で光回路を構成することが可能となる。以上の計算は伝搬方向に1回、逆伝搬方向に1回の計算であり、概ね数百回程度以下の計算繰り返し計算で所望の屈折率分布に到達することが可能であり、この方法であればパーソナルコンピュータにおいても現実的な計算量で実行可能となる。

【0028】

また、光信号として制御すべき性質として、波長、偏光、位相を前記入力光のパラメータとして与え、該パラメータに対応して前記出力フィールドを指定することにより、波長、偏光、位相に依存した前記出力フィールドを制御する前記光回路を構成し、前記位相は前記出力フィールドと前記入力フィールドとの相対的な位相関係を意味することを特徴とすることができる（実施形態1～7に対応）。

【0029】

この構成により、波長、偏波、位相、複屈折を光回路の構成により制御できるようにしている。これは、この回路の構成方法が、全てのパラメータの組み合わせを含んだ入力フィールドと光回路の状態と出力フィールドの組み合わせについて、いわば最適化する設計手法であるためで、それらをパラメータとして変化させたときの、入力フィールドと出力フィールドの組の組について、計算を実行することは常に可能であり、十分大きな回路規模であれば調整可能となる。具体的にはこれらの性質を用いて、波長多重合分波器、分散補償器、偏波スプリッタなど構成可能であり、さらには、偏波無依存化が可能となる。

【0030】

また、前記入力ポートに波長多重された入射光が入射されるように設定し、複数の前記出力ポートのそれぞれに異なる波長をもつ光を出射させるように設定することを特徴とすることができる（実施形態3、図9に対応）。

【0031】

また、前記入力ポートに偏波多重された入射光が入射されるように設定し、前記1又は複数の出力ポートを同一の出力ポートとして前記屈折率分布を調整することを特徴とすることができる（実施形態1、3、図3、9（b）に対応）。

【0032】

また、前記入力ポートに波長多重された入射光が入射されるように設定し、前記1又は複数の出力ポートを同一の出力ポートとして各波長においてその位相を調整し、所望の分散特性を実現することを特徴とすることができる（実施形態4、図11に対応）。

【0033】

また、前記入力ポートに偏波多重された入射光が入射されるように設定し、複数の前記出力ポートのそれぞれに異なる偏波をもつ光を出射させるように設定することを特徴とすることができる（実施形態3に対応、不図示）。

【0034】

また、前記入力ポートへの入射光を、複数の前記出力ポートに分配するように設定することを特徴とすることができる（実施形態6に対応、図14）。

【0035】

また、前記屈折率分布の初期値としてランダムな分布を用いることを特徴とすることができる（実施形態2、図7に対応）。

【0036】

また、前記出力ポートが複数あり平面波的なフィールドを出力とする場合に、隣接する前記出力ポート間の位相を異なる位相に設定することを特徴とすることができる（実施形態5、図13に対応）。

【0037】

尚、上述の製造方法とは、設計方法を含むことを意図している。

【0038】

本発明の以上の構成により、従来の光導波路回路を用いた光回路よりも十分小型の光回路を提供する、あるいは、屈折率分布において弱い屈折率の高低差でも十分な光信号の制御を可能とする光回路を提供する、とともに、その光回路の設計の実現可能な設計方法および光回路の構成を提供する。さらに、従来必要であった偏光依存性に対する補正を回路構成により実現する構成方法を提供する。

【0039】

【発明の実施の形態】

以下、図面を参照して本発明の実施形態を詳細に説明する。なお、各図面において同様の機能を有する箇所には同一の符号を付し、説明の重複は省略する。

【0040】

〔実施形態1〕

図1（a）～（c）は、本実施形態における光回路基板の基本構造と用語の説明の図である。まず図1参照して用語の説明をする。入力光3-1（入力フィールド）に対して光回路中の進行方向に垂直な断面における光のフィールドをその場所における伝搬像（伝搬フィールド、伝搬光）と呼ぶ。また、通常、増幅や減衰を含まない光回路では屈折率分布を一つ決めたとき、焦点以外では出力光3-2の像（出力フィールド）に対して一意に入力光3-1の像が決まる。本実施形態の説明においてはこれを逆伝搬像（逆伝搬フィールド、逆伝搬光）とよび、さらに一般に光回路途中で光のフィールドを考えたとき、そこを出発点にして考え

れば同様に出力光 3-2 の像に対して、その場所での逆伝搬像を考えることができるから、それもまた逆伝搬像とよび、光回路途中の場所ごとにそれを定義する。ここで、特に、光回路が同じで、出力フィールドが入力フィールドの伝搬フィールドとなっているとき、光回路途中での伝搬フィールドと逆伝搬フィールドは一致する。屈折率分布の決定方法を示すには、記号を用いるほうが見通しがよいので、それぞれの量を記号で表す（以下に記号と用語の概略を示す）。

【0041】

記号と用語の概略

z : 伝搬方向の座標 (0 が入射面、 z_e が出射面)

x : 伝搬方向に対する横方向の座標

フィールドとは、一般に電磁場（電磁界）あるいは電磁場のベクトルポテンシャル場と呼ばれるものを表している。特に、本実施形態では、屈折率分布により電磁場を制御するものであり、それに対し誘電体分布と電場（電界）との相互作用が支配的な役割を果たすので、本実施形態においてはフィールドとは電場（電界）のことと考えてよい。ただし、光を分離可能な状態として、波長と偏光状態もあるので、フィールドを光の一つの状態として指す場合は波長と偏光状態も含む。

$\psi^j(x)$: j 番目の入射フィールド（複素ベクトル値関数。入射面において設定する強度分布と、位相の分布と、波長と偏波により規定される。）

$\phi^j(x)$: j 番目の出射フィールド（複素ベクトル値関数。出射面において設定する強度分布と、位相の分布と、波長と偏波により規定される。）

$\psi^j(x)$ 、 $\phi^j(x)$ は回路中で、強度増幅や波長変換や偏波変換が行われない限り、光強度の総和は同じ（あるいは無視できる程度の損失）であり、波長も偏波も同じである。したがって、

$\{\psi^j(x), \phi^j(x)\}$: 入出力ペア。入出力のフィールドの組み。

は、入出射面における強度分布と、位相分布と波長と偏波により規定される。

$\{n_q\}$: 屈折率分布。光回路設計領域全体の値の組として考えるので、数学における集合に使われる記号 $\{\}$ を用いて全体の値の集まりを表している。 q は q 番目の繰り返しで得られた屈折率分布の意味。

n_{core} : 光導波路におけるコア部分と同様に周囲の屈折率に対して高い屈折率の値を示す記号

n_{clad} : 光導波路におけるクラッド部分と同様に n_{core} に対して低い屈折率の値を示す記号

$\psi^j(z, x, \{n_q\})$: j 番目の入射フィールド $\psi^j(x)$ を屈折率分布 $\{n_q\}$ 中を z まで伝搬させたときの、場所 (z, x) におけるフィールドの値。あるいは、 (z, x) をパラメータとしたその全体。

$\phi^j(z, x, \{n_q\})$: j 番目の出射フィールド $\phi^j(x)$ を屈折率分布 $\{n_q\}$ 中を z まで逆伝搬させたときの、場所 (z, x) におけるフィールドの値。あるいは、 (z, x) をパラメータとしたその全体。

【0042】

ここで、本実施形態はすべての j について $\psi^j(z_e, x, \{n_q\}) = \phi^j(x)$ あるいはそれに近い状態となるように $\{n_q\}$ を求める方法を与えるものである。

【0043】

入出力ポートとは、入射/出射端面におけるフィールドの集中した領域で、たとえば、その部分に光ファイバを接続することにより、光強度をファイバに伝搬できるような領域である。ここで、フィールドの強度および位相の分布は j 番目のものと k 番目のものでことなるようにとれるので、入射/出射端面に複数のポートの設定が可能である。そこで、入射ポート側にはアルファベットの太文字 A 、 B 、 C 、 \dots を充て、出射ポート側にはアルファベットの太文字 a 、 b 、 c 、 \dots を充てるものとする。

【0044】

その他、 α 、 γ 、 g や w は数値計算上の適当な係数であり、その程度については、文章中に示しているが、たとえば、通常の数値流体力学等で用いられるスキームの安定性の議論にしたがって実際の計算ではわずかに調整されるべきものである。

【0045】

まず、伝搬方向を z 、伝搬方向に対して垂直な方向を x で表し、さらに、入射面 2-1 での z の値を 0、出射面 2-2 での z の値を z_e とする。後述するように対象

とする区別可能な光の状態に順次番号をつける。このとき、 j 番目の入力フィールドと、それに対応し出射させたい所望の出力フィールドをそれぞれ $\psi^j(x)$, $\phi^j(x)$ とする。ここで、電磁界は実数ベクトル値の場で、かつ波長と偏光状態をパラメータとしてもつとするが、その成分の値を一般に数学的に取り扱いが容易な複素数にとって、電磁波の解を表し、さらに以下の計算においては全体としての強度が 1 に規格化されているとする。 j 番目の入力および出力フィールドとは、フィールドの強度分布と位相分布、あるいは、波長、偏光により互いに区別される属性を有する光の組の要素に対して適当に順番をつけたものである。

【0046】

図 15 は、従来の光回路の構成の例（アレイ導波路格子回路）である。図 15 にあるように波長多重通信における $1 \times N$ 波長分波器（ N は波長の数）を考えると、たとえば、1 入力ポート 3-1 に対して、ほぼ同様なフィールド強度と位相分布をもつ入力フィールドで、波長 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_N$ の異なる N 個の信号に番号をつけ、その j 番目の波長の光を所望の個別の出力ポート 3-2 から出力させる。そのときの出力の分布は、光を分波するためには、導波路の出射面の断面で考えた光強度および位相の分布として、独立な出力フィールドパターンとなっていることが求められるから、これを j 番目の出力フィールドと呼ぶ。光ファイバへの出力を想定すれば、光ファイバのフィールドパターンで、場所が異なるようなフィールドの組となる。与えられた入力フィールドの組を所望の出力フィールドで出力する光回路を構成するので、入力フィールドあるいは出力フィールドは、フィールドの強度および位相の分布として、 j 番目と k 番目のパターンで同一であってもよい。さらに、 j 番目の入射および出力フィールド $\psi^j(x)$, $\phi^j(x)$ に対し、伝搬フィールドと逆伝搬フィールドをそれぞれ場所の複素ベクトル値関数として $\psi^j(z, x, \{n\})$, $\phi^j(z, x, \{n\})$ と表す。それぞれの関数の値は屈折率分布 $\{n\}$ により変化するので、それぞれの関数は屈折率分布 $\{n\}$ をパラメータとしてとっている。特に、記号の定義から、 $\psi^j(x) = \psi^j(0, x, \{n\})$, $\phi^j(x) = \phi^j(z_e, x, \{n\})$ である。これらの値は入射および出力フィールド $\psi^j(x)$, $\phi^j(x)$ と屈折率分布 $\{n\}$ が与えられれば、良く知られたビーム伝搬法などにより容易に計算できる。

【0047】

以下、一般的なアルゴリズムを示す。図2にその計算の流れを示す。図2は、本実施形態1の光回路設計の流れを簡単に示した図である。以下の計算は繰り返し実行されるので、繰り返し回数を q で表し、 $q-1$ 番目まで計算が実行されているときの q 番目の計算の様子を示す。 $q-1$ 番目の計算によって得られた屈折率分布 $\{n_{q-1}\}$ をもとに、各 j 番目の入力および出力フィールド $\phi^j(x)$, $\phi^j(x)$ に対し伝搬フィールドと逆伝搬フィールドを数値計算により求め、各々 $\phi^j(z, x, \{n_{q-1}\})$ 、 $\phi^j(z, x, \{n_{q-1}\})$ と表す(ステップS220)。これをもとに各場所 (z, x) における屈折率 $n_q(z, x)$ を

$$n_q(z, x) =$$

$$n_{q-1}(z, x) - \alpha \sum_j \text{Im}[\phi^j(z, x, \{n_{q-1}\})^* \cdot \phi^j(z, x, \{n_{q-1}\})] \text{--- (1)}$$

とおく(ステップS240)。ここで、 \cdot は内積演算を表し、 $\text{Im}[]$ はその虚数成分で、 $*$ は複素共役である。 α は正の小さな値で、 $n_q(z, x)$ の数分の1以下の値をさらにフィールドの組の数で割った値である。 \sum_j は j について和をとるという意味である。これを繰り返し、伝搬フィールドの出射面における値 $\phi^j(z_e, x, \{n\})$ が出力フィールド $\phi^j(x)$ に十分近づけば計算終了である(ステップS230)。

【0048】

以上の計算では、屈折率分布の初期値 $\{n_0\}$ は適当なものをとればよいが、予想される屈折率分布に近ければ計算の収束が早くなる(ステップS200)。また、各 j について $\phi^j(z, x, \{n_{q-1}\})$, $\phi^j(z, x, \{n_{q-1}\})$ を計算するにあたっては平行に計算が可能な計算機の場合は、 j ごと、 $\phi^j(z, x, \{n_{q-1}\})$, $\phi^j(z, x, \{n_{q-1}\})$ ごとに計算すればよいので、クラスタシステム等を利用して計算を効率化することができる(ステップS220)。また、計算機の構成が比較的少ないメモリで行う場合は、(1)の j についての和の部分で、各 q で適当な j を選んでその分の $\phi^j(z, x, \{n_{q-1}\})$, $\phi^j(z, x, \{n_{q-1}\})$ のみ計算して、計算を繰り返すことも可能である(ステップS220)。

【0049】

以上において式(1)の $\text{Im}[\phi^j(z, x, \{n_{q-1}\})^* \cdot \phi^j(z, x, \{n_{q-1}\})]$ は $\phi^j(z,$

$x, \ln q_{-1})$ 、 $\psi^j(z, x, \ln q_{-1})$ の値が近い値のとき、位相差に対応する値で、この値を減少させることで、所望の出力を得ることが可能である。

【0050】

即ち、誘電体からなる光回路において入力ポートと出力ポートをもち、光信号を制御し、入力ポートから入射した光を所望の出力ポートに出射させる光部品で屈折率分布により、入出力ポートからの出射光を回折しつつ、複数回の散乱による干渉を用いて、光回路を構成することを特徴とする光部品の設計方法として、入力ポートから入射した伝搬光のフィールド分布1（伝搬光）および入力ポートから入射した光信号の期待される出力ポートからの出力フィールドを出力ポート側から逆に伝搬させた光（位相共役）のフィールド分布2（本実施形態において逆伝搬光と呼ぶ）を数値計算により求め、それをもとに、伝搬光と逆伝搬光の各点における位相差を減少させるように、（入力ポートと出力ポート間の誘電体の）屈折率分布を繰り返し配置して、入力フィールドの伝搬後の出力と所望の出力フィールドが所望の誤差以下となるまで、計算を繰り返す。さらに、屈折率分布を得るための方法として、各点の屈折率分布を変数として最急降下法により得られる方向に屈折率を変化させることにより、最急降下法の原理に基づき、屈折率を（1）のように変化させることでその差を減少させることが可能となる。

【0051】

特に、以下に示すようないわゆるステップインデクス型の光回路の場合には、屈折率の取り得る値が限られているため、（1）で回路ができるかどうかは自明ではない。しかし、光回路を構成するにあたり、条件としては局所的であっても、その調整を繰り返すことにより、屈折率の取り得る値が限られている場合においても、大域的に位相の調整がなされる。本実施形態ではこれを適用し光回路を得る。即ち、光回路の誘電体の屈折率の値として上限および有限個の段差を有する屈折率分布を用い、その値を制限値としながら計算する。

【0052】

本実施形態においてはこれを、ステップインデクス型平面光導波路と同様の構造で、コアの形状をドット状にパターン化したものに適応し、 $1.31\mu\text{m}$ と $1.55\mu\text{m}$ の波長分割フィルタを設計した。光導波路としては、石英の光導波路を想定した

。屈折率分布はコア（高屈折率部分）とクラッド（低屈折率部分）の2種類だけを考え、その2種類の屈折率の基板内の分布を計算することとした。ここで、上記のアルゴリズムでは、屈折率の値を自由に取れるとしているが、 $\{v_q\}$ なる分布を

$$v_q(z, x) = v_{q-1}(z, x) - \alpha \sum_j \text{Im}[\phi^j(z, x, \{n_{q-1}\})^* \cdot \phi^j(z, x, \{n_{q-1}\})]$$

と計算し、

$$v_q(z, x) > (n_{\text{core}} + n_{\text{clad}})/2 \text{ のときは } n_q(z, x) = n_{\text{core}}$$

$$v_q(z, x) < (n_{\text{core}} + n_{\text{clad}})/2 \text{ のときは } n_q(z, x) = n_{\text{clad}}$$

とした。 n_{core} はコアに相当する屈折率、 n_{clad} はクラッドに相当する屈折率である（一般に $n_{\text{core}} > n_{\text{clad}}$ ）。このような計算でも以下に示すように十分に所望の光出力を得ることができる。さらに、簡単のため2種類の屈折率のうちコアのパターンに相当する屈折率を有効屈折率として、計算を進行方向1次元、横方向1次元の計算とした。

【0053】

図3（a）、（b）は、本実施形態1の光回路設計の設定を示した図である。まず、入力ポートには偏波多重された光を用い出力ポートを同一の出力ポートとして屈折率分布を調整することにより、図3（a）のように、波長 $1.31\mu\text{m}$ の入力フィールド $\phi^1(x)$ と出力フィールド $\phi^1(x)$ （すなわち、上記の記号で $j=1$ ）の組と、図3（b）のように、波長 $1.55\mu\text{m}$ の入力フィールド $\phi^2(x)$ と出力フィールド $\phi^2(x)$ （すなわち、上記の記号で $j=2$ ）の組を設定した。フィールドは入射面2-1、出射面2-2の全域について定義されるものであるが、分かりやすいようにフィールド強度が集中している部分のみ図中に表した。このような入出力フィールドの組 $\{\phi^j(x), \phi^j(x)\}$ を、以降、入出力ペアと呼ぶ。

【0054】

図4（a）、（b）は、本実施形態1による屈折率分布と透過スペクトルの図である。上記のアルゴリズムにしたがって屈折率を計算する約200回の繰り返しにより、図4（a）の回路が得られる。ここで、黒色部以外の部分1-1の屈折率として石英ガラスを想定し、黒色の部分（高屈折率部；誘電体多重散乱部）1

1-1の石英ガラスに対する屈折率差1.5%とした。光回路のサイズは縦 $300\mu\text{m}$ 、横 $140\mu\text{m}$ である。屈折率分布に対する計算上のメッシュは 140×300 で、屈折率分布のパラメータ数は42000でこれを最適化する必要がある。本実施形態の方法ではなく単純な最急降下法を用いて、パラメータ1つにつき1つずつ数値微分をとって最適化する場合、42000の光の伝搬を計算してようやく、1ステップ分の計算が実行される。それに対して、本実施形態では2回の光の伝搬で済むため、現実的な計算時間での設計が可能となる。

【0055】

光回路の特性として、その透過スペクトルは、図4(b)のようになり、波長による合分波器が形成されていることがわかる。図4(a)からわかるように、もともと屈折率の高い部分（ここではコアあるいは第2高屈折率部と呼ぶ）の分布は間欠的で基板に対して厚み方向への光の閉じ込めが不十分になると考えられる。そこで、改めて、設計される光回路の屈折率分布として、平面光波回路状の屈折率分布を擁し、さらに、屈折率分布の形状として、基板に対して垂直方向に閉じ込め構造を有する屈折率分布を対象として、光回路を設計することにより、基板厚み方向の屈折率分布を図5のように配置し、濃い網掛部分（誘電体多重散乱部）1-11bを上記計算のコア（第2高屈折率部）の分布として用いることとした。

【0056】

図5は、本実施形態1の屈折率分布を平面光波回路において実現するための誘電体の屈折率分布の設定の様子を示す図である。ここで、図5の屈折率は有効屈折率として、計算と同様に1.5%となるように調整している。図の側面が屈折率分布を表しており、基板の厚み方向には、コアが高屈折率の層1-11aにはさまれている構造になっている。以上のようにコア（誘電体多重散乱部）1-11bの周りの高屈折率の誘電体層1-11aにより基板厚み方向の光の閉じ込めが容易に実現できる。さらに、入出力部分については、第1高屈折率部1-11aで光をガイドする場合（図5中段）と第2高屈折率部（誘電体多重散乱部）1-11bコアで光をガイドする場合（図5下段）が考えられ、第1高屈折率部、第2高屈折率部の形状の組み合わせによりフィールド径の調整を行い光ファイバと

の光結合の最適化が可能である。

【0057】

ここで、出力フィールドは複素数値で計算され、位相を含めて一致するように計算される（後述の実施形態4）ので、例えば、この光回路と無反射コートを施した半導体光アンプと組み合わせることで外部共振器レーザーを作製する場合など、位相も調整する必要がある場合にも適用可能である。

【0058】

以上の光のフィールドの計算はビーム伝搬法を用いたが、メモリが十分にある場合は時間領域差分法を用いて計算してもよい。一般にビーム伝搬法は直線的な方向への光出力を計算するため、出力ポートの位置が限定される。例えば、この実施形態の場合は、入射面の対向面が出射面であった。そこで、時間領域差分法を適用することにより、出力ポートの位置を自由に選べ、光路を急激に曲げる回路等を容易に作ることができる。このことは、以下の実施形態においても同様である。

【0059】

以上の回路を従来の方向性結合器を組み合わせ光導波路回路でつくと、方向性結合器部分だけで、数百 μm を要することとなる。それに対して本実施形態の方法であれば数分の1程度の大きさで回路を構成することができる。

【0060】

[実施形態2]

実施形態2は上記と同じ回路を次のような方法で構成したものである。即ち、屈折率分布を得るための方法として、適当な屈折率分布に対してまずフィールド分布1を求め、期待される出力ポートからの出力光のフィールドに対する逆伝搬光（フィールド分布2）を入射面に向けて逐次求める方法によりもとめる。その際にフィールド分布1との位相を整合させるように、屈折率分布を変更し、その変更した屈折率分布を用いて、逐次フィールド分布2を求めるという操作を繰り返す。入射面に達した時点で、今度は逆に、入力フィールドに対してフィールド分布1を伝搬方向に逐次計算しながらもとめる。先ほど求めたフィールド分布2と同様に位相を整合するように屈折率分布を決めながら数値的に伝搬させ、フィ

ールド分布 1 を出射面に達するまで計算する。再び、出射面からフィールド分布 2 を求めるといように、相互方向に逆伝搬あるいは伝搬させながら屈折率分布を逐次改め、入力フィールドの伝搬後の出力と所望の出力フィールドが所望の誤差以下となるまで、計算を繰り返す。

【0061】

後に示すように、これにより回路の設計に要する時間が短縮され、より大規模な光回路の設計が現実的に可能となる。

【0062】

まず、アルゴリズムを示す。図 6 にその計算の流れを示す。図 6 は、本実施形態 2 の光回路設計の流れを簡単に示した図である。実施形態 1 と同じ記号を用いて

$$n_q(z+dz, x) =$$

$$-\gamma \sum_j \arg [\phi^j(z+dz, x, \{n_{q-1}\})^* \cdot \psi^j(z, x, \{n_q\})] \quad \text{--- (1')} \quad (1')$$

$$n_{q+1}(z-dz, x) =$$

$$-\gamma \sum_j \arg [\phi^j(z, x, \{n_{q+1}\})^* \cdot \psi^j(z-dz, x, \{n_q\})] \quad \text{--- (1'')} \quad (1'')$$

とするものである。ここで、記号の意味は、(1') においては、 $\phi^j(z, x, \{n_{q-1}\})$ が全域で与えられているとして、求めた $n_q(z, x)$ をもとに $\psi^j(z, x, \{n_q\})$ を求め (ステップ S 6 7 0)、それをもとにさらに、 z から微小距離 dz だけ進んだ点 $z+dz$ において $n_q(z+dz, x)$ を決める (ステップ S 6 8 0) ということである (ステップ S 6 5 5)。ここで、 \cdot は内積演算を表し、 $\arg[]$ はその偏角で、 $*$ は複素共役である。

【0063】

また、(1'') においては、 $\psi^j(z, x, \{n_q\})$ が全域で与えられているとして、求めた $n_{q+1}(z, x)$ をもとに $\phi^j(z, x, \{n_{q+1}\})$ を求め (ステップ S 6 2 0)、 z の dz だけ戻った点 $z-dz$ において $n_{q+1}(z-dz, x)$ を求める (ステップ S 6 3 0) ということである (ステップ S 6 0 5)。(1') (ステップ S 6 5 5) と (1'') (ステップ S 6 0 5) を交互に繰り返す (ステップ S 6 9 7) ことにより計算を進めていく。ここで、 γ は係数で、 $(2k_0 dz)^{-1}$ 程度の値を入出力ペアの数で割ったものである (「程度」としている理由は比有効屈折率程度の変化があ

るという意味である)。ここで、 k_0 は真空中の波数で、考えている入力信号の平均の波数程度である。

【0064】

本実施形態の計算においては、微小距離 dz で位相整合をさせることを意味しており、実際の計算では周期の短い振動が発生し大きな計算誤差を生じる。そこで γ に適当な稀有数 g をかけて、 $g\gamma$ が $(2k_0dz)^{-1}$ の数分の1以下の値となるように、また、フィールドの位置についても、完全な $z+dz$ ではなく、その途中の値あるいは $n_q(z+dz, x)$ が z と $z+2dz$ 中心での値となるように $z+wdz$ ($0 \leq w \leq 2$) として

$$\begin{aligned} n_q(z+dz, x) &= (1-g) n_{q-1}(z+dz, x) \\ &\quad - g\gamma \sum_j \arg [\phi^j(z+wdz, x, \{n_{q-1}\})^* \cdot \phi^j(z, x, \{n_q\})] \quad \text{--- (1'')} \\ n_{q+1}(z-dz, x) &= (1-g) n_q(z-dz, x) \\ &\quad - g\gamma \sum_j \arg [\phi^j(z, x, \{n_{q+1}\})^* \cdot \phi^j(z-wdz, x, \{n_q\})] \quad \text{--- (1''')} \end{aligned}$$

として、 $0 < g \leq 1$ のパラメータによる加重平均により、短周期の振動を抑制する処方をとった。ここでは、 $w=1$ とし、 $g=0.25$ とした。また、屈折率分布は実施形態1と同様のステップインデックス型を想定し、同様の離散化の処方をとった。

【0065】

本実施形態の光回路としては実施形態1と同じものを設定した。図8(a)、(b)は、実施形態1と実施形態2の計算の収束の様子を示した図である。図8(a)、(b)は実施形態1と実施形態2の繰り返し回数に対する所望の出力ポートへの透過率と他出力ポートへの漏話を表示したものである。繰り返し回数は図2と図6のループの繰り返し数に相当し概ね同等の計算量になっている。両方のグラフを比較するとわかるように、実施形態1の計算方法が200回程度で収束しているのに対して、実施形態2の方法は数回で収束している。数十倍速く収束しているので、実施形態2の方法は比較的大きな規模にも適用可能である。

【0066】

また、図7(a)、(b)は、本実施形態2による屈折率分布と透過スペクトルを示す図である。図7の屈折率分布は図4の屈折率分布より高屈折率部分(黒

色；誘電体多重散乱部) 1-1 1 が一様に分布している。このため、有効屈折率としては一様になるため、基板厚み方向の有効屈折率の一様性が増して、厚み方向の光の閉じ込めのムラが減って厚み方向への光の散逸を抑制することが可能となり、図5上図にあるような屈折率分布を用いず、1層の構造で光回路が実現可能である。特に、屈折率分布の初期値として、ランダムな屈折率分布を設定することにより、屈折率分布がよりいっそうランダムに分布することができ、1層の構造で光回路を実現するのに適した構造を実現できる。

【0067】

〔実施形態3〕

実施形態3は1.53, 1.54, 1.55, 1.56 μm の4波長の波長多重合分波回路の設計方法である。図9(a)、(b)は、本実施形態3の4波長の分波器の光回路設計の設定を示した図である。図9(a)に示すように、入力ポートには波長多重された光を用い出力ポートを複数個設けそれぞれに異なる波長をもつ光を出射させるように、入射面2-1に1ポート3-1を設定し、出射面2-2にa, b, c, dの4ポート3-2を設定する。入射面2-1のポート3-1は4波長を入射することとし、出射面2-2のポート3-2にはそれぞれ、左から1.53, 1.54, 1.55, 1.56 μm の波長を割り当てポートa, b, c, d(以下、ポートa, ポートb, ...と略記)のフィールドと、入射側のそれぞれ1.53, 1.54, 1.55, 1.56 μm の波長をもったフィールドとの組あわせで一組とし、計4組で設定する。

【0068】

図10(a)、(b)は、本実施形態3の透過損失のスペクトラムである。このとき、光のフィールドを基板1に対していわゆるTEモードと呼ばれる偏光状態として設定すると、出射スペクトルは図10(a)のようになる。ここで、入射光として設計に用いたTEモードを太線で表し、それと直交する偏波状態TMモードを細線で表した。これは、光回路の構造に対して、実効的な屈折率がTEモードとTMモードでわずかに異なるためである。そこで、この実施形態では、入力ポートには偏波多重された光を用い出力ポートを同一の出力ポートとして屈折率分布を調整することにより、偏光状態について入射光と出射光のペアを設定するとともに、入力ポートには波長多重された光を用い出力ポートを複数個設け

それぞれに異なる波長をもつ光を出射させることによって波長多重も同時に行った(図9(b))。このときTEとTMモードで同一の波長は同一の出射ポートとし、合計8組の入出力ペアにより回路を計算した。これにより図10(b)に示すように、偏光状態の異なるために生じる透過損失の違いを低減できる。

【0069】

尚、図9(b)の変形として、入力ポートには偏波多重された光を用い、偏波ごとにことなる出力ポートに出力させるように調整してもよい(不図示)。

【0070】

以上のように、たとえば、波長と偏光状態をパラメータとして入出力のフィールドの組を設定すれば、偏光に依存しない回路(逆に偏光に依存する回路)ができる。さらに、基板すなわち媒質のもつ複屈折パラメータとすることで、偏波依存性を取り除くことが可能となる。

【0071】

さらに、従来の石英系の光導波路を用いたアレイ導波路格子で同等の機能回路を構成する場合、アレイ導波路の本数を十分に取るためにスターカプラの部分だけで数mmを要する。また、アレイ導波路も湾曲させる必要があるため、回路が数mm角以上、典型的には1cm角以上のものとなる。さらに偏波依存性をなくすために、波長板を挿入する場合がある。本実施形態の光回路の設計を用いることにより、従来の100分の1以下の大きさで、光回路を構成することが可能となる。

【0072】

[実施形態4]

実施形態4は光波長帯域透過回路を構成した例である。この実施形態では、入力ポートには波長多重された光を用い出力ポートを同一の出力ポートとして各波長においてその位相を調整し、所望の分散特性を実現する。入力是一个のポート3-1として、出力側ポート3-2には、1530~1540nm帯域をポートa、1550~1560nm帯域をポートbに充てている。計算方法としては、実施形態2の方法を用いて、得ようとする透過帯域に光信号の組を波長空間で一様に分布させる。ここでは、実施形態3と同じ分解能と回路規模を用いている。この場合、図10にあるよ

うに1波長だけの組を設定したときの、3dB減衰波長帯域幅が片側約5nmであることから、波長の間隔を5nmとし得ようとする透過帯域に光信号の組を一様に分布させた。

【0073】

図11(a)、(b)は、実施形態4の光回路設計の設定を示した図である。図12(a)、(b)は、実施形態4の透過損失のスペクトラムである。すなわち、図11(a)に示すように、1530, 1535, 1540nmをポートaに、1550, 1555, 1560nmをポートbに出力する、として合計6組の光信号を用いた。これにより、図12(a)にあるように、概ね矩形状の透過スペクトルが得られる。しかしながら、短波長領域においては、透過を十分抑制するに至っていない。そこで、本実施形態においては、さらに、出力側にもう1ポートを加え図11(b)のように、1510, 1515, 1520nmの3組の光信号を加えた。これにより、短波長領域においても十分に光の透過を阻止することが可能となり、必要とする、矩形状の透過フィルタを得ることができた(図12(b))。

【0074】

[実施形態5]

実施形態5は実施形態4と同様に光波長帯域透過回路を構成したものである。波長や領域の大きさのパラメータを変えた以外に実施形態4と異なる点は、上記実施形態1～4では入力と出力のフィールドを場所の実数値ベクトル関数としたが、本実施形態においては、光回路の設計において、出力ポートが複数ある場合で、平面波的な(=位相に分布のない)フィールドを出力とする場合に、隣接するポート間の位相を異なる位相とすることにより、ポートaとポートbのフィールドとして一様な複素数値として位相差を加えたことである。図13(a)、(b)は、実施形態5の回路の設定と透過損失のスペクトラムの図である。図13(a)に示すように、具体的には、入射ポート3-1との位相差をポートaでは0、ポートbでは π とした。また、ポートaとポートbの間隔を $7\mu\text{m}$ と極端に近づけた。これにより、ポートaに出るべき光がポートbに漏話する、あるいは、ポートbに出るべき光がポートaに漏話するのを抑制することができる。これは同じ位相の場合は漏話光と非漏話光がポートa、ポートbともにほぼ同じ位相をもっているた

めに、漏話光と通常の信号光が同じように集光されるため漏話光が大きくなるのに対して、位相が異なる場合は、他の部分からの漏話光と干渉して、漏話光の集光が抑制されるためである。

【0075】

図13 (b) の破線はポートaとポートbの位相が同一の場合である。一方、図13 (b) の実線はポートaとポートbの位相を π だけ変えた場合である。これにより、漏話が抑制され急峻な矩形フィルタが得られた。

【0076】

上記の実施形態は各チャンネルに位相を設定するだけで位相が制御可能であることを示している。位相の関係は出射ポートだけでなく、入射ポートとの間に設定されるものであるから位相制御することにより他の導波路回路などと組み合わせMach-Zehnder干渉回路等を構成することが可能である。

【0077】

[実施形態6]

図14 (a) ~ (d) は、実施形態6の回路の設定と透過損失のスペクトラムの図ある。実施形態6は、図14 (a) に示すように、入射ポート3-1としてポートAから波長1.29, 1.30, 1.31, 1.32 μm の光を4つに分波し、ポートBからの1.55 μm の光を4つのポート3-2に分配する回路の例である。たとえば、距離の異なる位置に置かれた4つの端末に1つの基地端末からファイバを接続し、データ通信に1.29, 1.30, 1.31, 1.32 μm の波長の光を充てて、かつ、1.55 μm の光を分配し一斉に配信する場合に、1.55 μm については、均等に分配するよりも、光ファイバの損失に応じて1.55 μm の光を分配すれば、より遠くと近くの端末に同等の光信号強度を送信できる。このような状況を設定して、本実施形態では、図14 (b) に示すように、1.55 μm の光をポートa, ポートcには1/6、ポートb, ポートdには1/3ずつ分配することとした。すなわち、出射フィールドの出射端面2-2における強度分布を、強度の異なる4つのポート3-2の分布の重ね合わせとして、実施形態2の計算を実行した。ここで、1.55 μm の光の他に、1.29, 1.30, 1.31, 1.32 μm の光については上記実施形態3と同様に4つの組を設定している。

【0078】

図14(c)、(d)は実施結果のスペクトルである。図14(c)は入力ポートAから光を入力したときのスペクトラムであり、4つの出力ポートに波長に応じて光が分波されていることが分かる。一方、図14(d)は入力ポートbから光を入射した場合で、 $1.55\mu\text{m}$ の光が概ねポートa, ポートcには $1/6(=8\text{dB})$ 、ポートb, ポートdには $1/3(=5\text{dB})$ の割合で分配されているのがわかる。

【0079】

以上のように、本実施形態を用いることで、容易に光を分配する回路を設計することが可能である。さらに、光回路の機能として、この回路は、当然、逆向きに光を入射すれば光を合波することも可能である。本実施形態のように、波長分波器と光分配器を同一の屈折率分布で実現しているように、異なる機能を同一の回路上に容易に集積可能である。

【0080】

[実施形態7]

図16(a)、(b)は、実施形態7の図で、図16(a)は電極構造の断面図、図16(b)はその素子を用いた光回路の例である。

【0081】

図16(a)は、複数の組の屈折率分布を電気光効果により基板上に必要に応じて生じさせることを特徴とする光波形整形器の例として、シリコン基板上に、光学的に透明な絶縁膜（ここでは石英ガラス）を介して電極をマトリクス状に設けて再構成可能な光回路を構成する例である。絶縁膜は $0.3\mu\text{m}$ 程度、ドープ領域は $3\mu\text{m}$ 程度の厚みである。この例ではさらにその下にガラス層がある所謂Silicon-On-Insulator(SOI)構造の基板を用いている。電極に電圧を掛けることにより電子濃度の変化から 10^{-3} 程度の比屈折率差を与えることが可能である。これはMOS構造であるので、通常の半導体プロセスにより容易に微細かつ大規模なものをつくることが可能である。一般に 10^{-3} の比屈折率差では光導波路構造をつくったとしても非常に閉じ込めが弱いいため現実的な回路を構成することは困難であるが、UV光により石英ガラスに書き込むファイバグレーティングのような弱い屈折率変調でも大きな光の反射が可能なと同様に、広い領域計

算領域を用いて本実施形態により光回路を設計すれば実用的な光回路を構成することができる。

【0082】

上記実施形態1から6のように屈折率分布のパターンを設計し、その屈折率分布に合わせて電圧の分布を生じさせることにより光回路を構成できる。特に、複数の屈折率分布をあらかじめ半導体メモリ等に入れておき、必要に応じて電圧の分布を変化させることで光回路を再構成できる。また、回路はMOSのプロセスを適用できるので、フラッシュメモリと同様の構成を用いれば書き込み式の光回路を構成できる。すなわち、ソース、ドレイン、フローティングゲートとコントロールゲートを回路の一部に設け、ソース、ドレイン部分の屈折率制御は放棄して、フローティングゲート直下の屈折率変化により光回路を構成する。ここで、ソース、ドレイン部分へは回路再構成の際にのみ通電すればよいので、屈折率分布としては電圧をOFFにした状態で回路を構成すればよい。

【0083】

本実施形態により、5mm角程度のチップサイズに100万電極程度をマトリックス状に配置し波形整形器ができた。これは基板に対してフィールド径として数百ミクロンに拡大し、かつ、位相分布を制御するもので、突き当て結合により結合したスラブ導波路を介して対向する同様の素子に対して光合分波が可能である。ここで、これらの光部品（ファイバ、本実施形態の素子、スラブ導波路）は光学的に透明な接着剤で接合されている。図16（b）は図16（a）の素子を用いた光回路の例で、ここではフィールドを拡大するとともに横方向に一様な位相勾配を与えることで左端下から右上に光信号を伝搬させている。位相を適当に調整することにより複数のチャンネルへの分配も可能である。

【0084】

〔実施形態の効果〕

以上の光回路の設計法により、光回路の小型化が可能となるとともに、所望のパラメータの調整が容易に実現される。以上の方法は、光部品の小型により低コスト化を進めるとともに、光機能の光集積化を進める上で極めて有効な方法である。

【0085】

【発明の効果】

以上説明したように本発明によれば、光回路は、誘電体からなり、入力ポートと1又は複数の出力ポートとを有し、光信号を制御し、入力ポートからの入射光を所望の出力ポートに出射させる際に、屈折率分布により、入力ポートからの入射光を回折しつつ、複数回の散乱による干渉を用いる。

【0086】

このため、小型で効率よく光信号を制御できる光回路を提供できる。

【図面の簡単な説明】

【図1】

本発明の実施形態1の光回路基板の基本構造と用語の説明の図で、(a)は伝搬方向の座標、(b)は順伝搬、(c)は逆伝播を示す図である。

【図2】

本発明の実施形態1の光回路設計の流れを簡単に示した図である。

【図3】

本発明の実施形態1の光回路設計の設定を示した図で、(a)は $j=1$ の組、(b)は $j=2$ の組を示す図である。

【図4】

本発明の実施形態1の屈折率分布と透過スペクトルの図で、(a)は屈折率分布、(b)は透過スペクトルを示す図である。

【図5】

本発明の実施形態1の屈折率分布を平面光波回路において実現するための誘電体の屈折率分布の設定の様子を示している図である。

【図6】

本発明の実施形態2の光回路設計の流れを簡単に示した図である。

【図7】

本発明の実施形態2の屈折率分布と透過スペクトルの図で、(a)は屈折率分布、(b)は透過スペクトルを示す図である。

【図8】

本発明の実施形態の計算の収束の様子を示した図で、(a)は実施形態1、(b)は実施形態2を示す図である。

【図9】

本発明の実施形態3の4波長の分波器の光回路設計の設定を示した図で、(a)は偏光状態のうちTEモードのみを用いる場合、(b)はTEモードとTMモード両方を用いる場合を示す図である。

【図10】

本発明の実施形態3の透過損失のスペクトラムの図で、(a)は偏光状態のうちTEモードのみを用いた場合、(b)はTEモードとTMモード両方を用いた場合を示す図である。

【図11】

本発明の実施形態4の光回路設計の設定を示した図で、(a)は単純なバンド透過フィルタの設定、(b)はバンドを整形用のダミーポートを加えた場合を示す図である。

【図12】

本発明の実施形態4の透過損失のスペクトラムの図で、(a)は単純なバンド透過フィルタの場合、(b)はバンドを整形用のダミーポートを加えた場合を示す図である。

【図13】

本発明の実施形態5の回路の設定と透過損失のスペクトラムの図で、(a)は帯域透過フィルタの出力ポートの設定、(b)は透過損失のスペクトラムを示す図である。

【図14】

本発明の実施形態6の回路の設定と透過損失のスペクトラムの図で、(a)は入出力ペアの設定、(b)は $1.55\mu\text{m}$ の出射フィールド分布の設定、(c)はポートAから入射した場合の透過スペクトル、(d)はポートBから入射した場合の透過スペクトルを示す図である。

【図15】

従来の光回路の構成の例(アレイ導波路格子回路)を示す図である。

【図 16】

本発明の実施形態 7 の図で、(a) は電極構造の断面図、(b) はその素子を用いた光回路の例を示す図である。

【符号の説明】

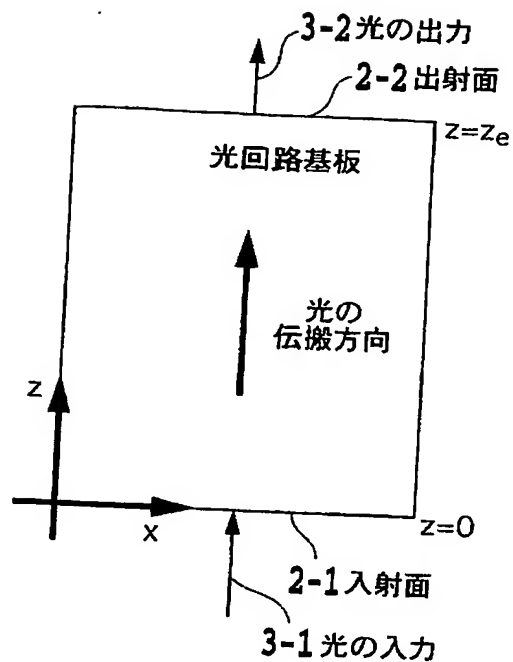
- 1 光回路基板
 - 1-1 光回路設計領域
 - 1-11 高屈折率部分
 - 1-11a 第一高屈折率部分
 - 1-11b 第二高屈折率部分
 - 1-12 低屈折率部分
 - 2-1 入射面
 - 2-2 出射面
 - 3-1 入力ポートあるいは光の入力 (方向)
 - 3-2 出力ポートあるいは光の出力 (方向)

【書類名】

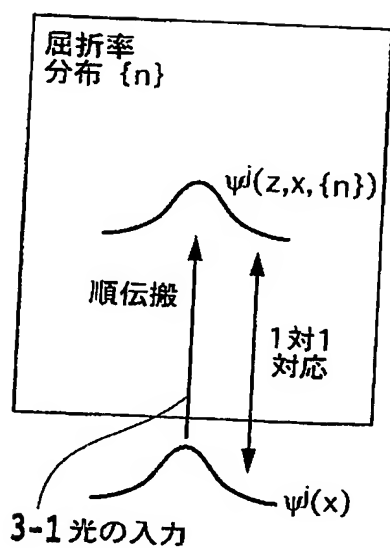
図面

【図 1】

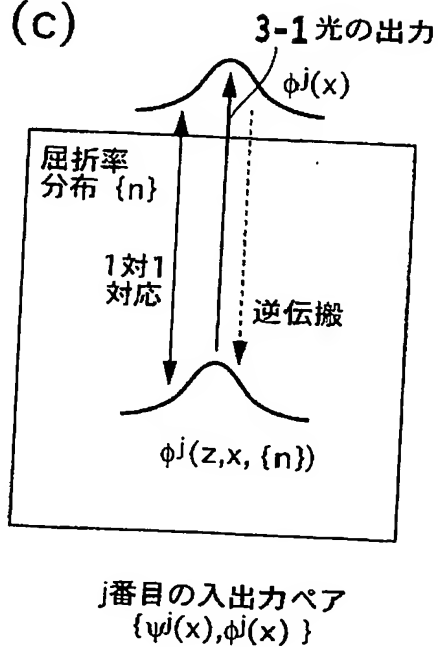
(a)



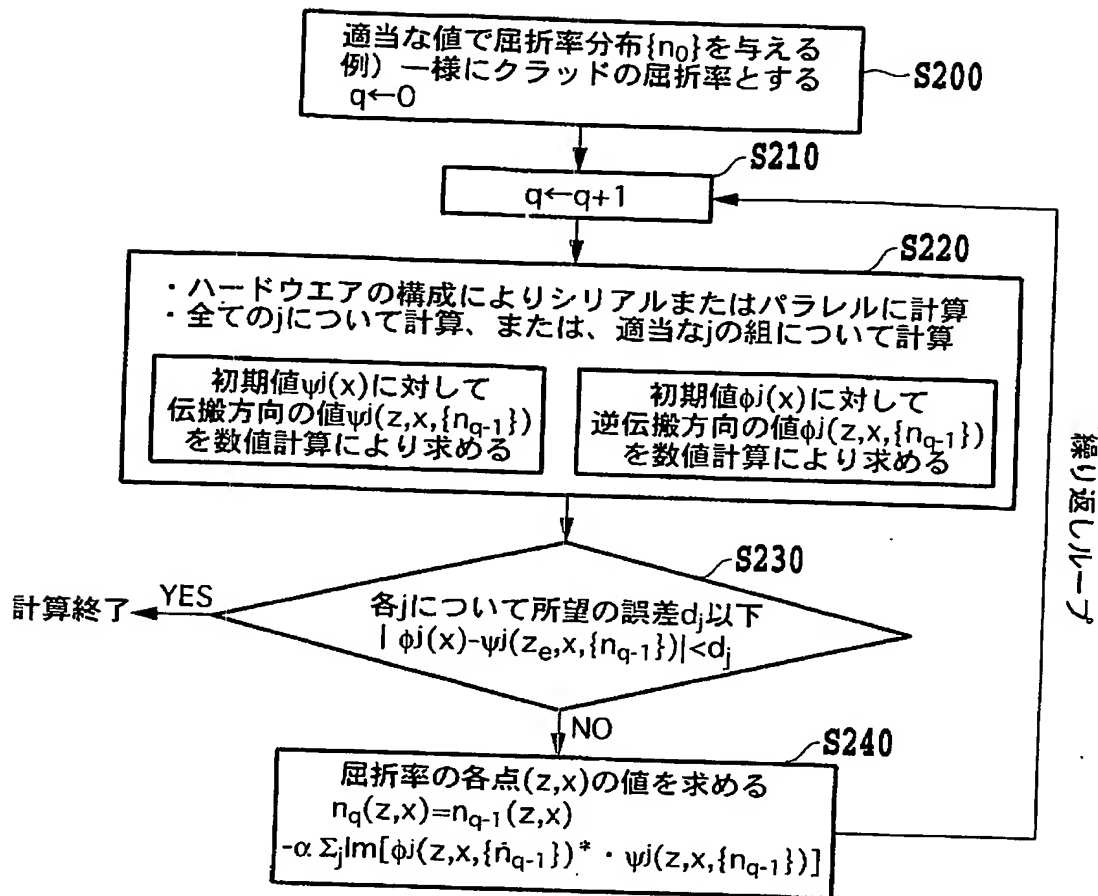
(b)



(c)



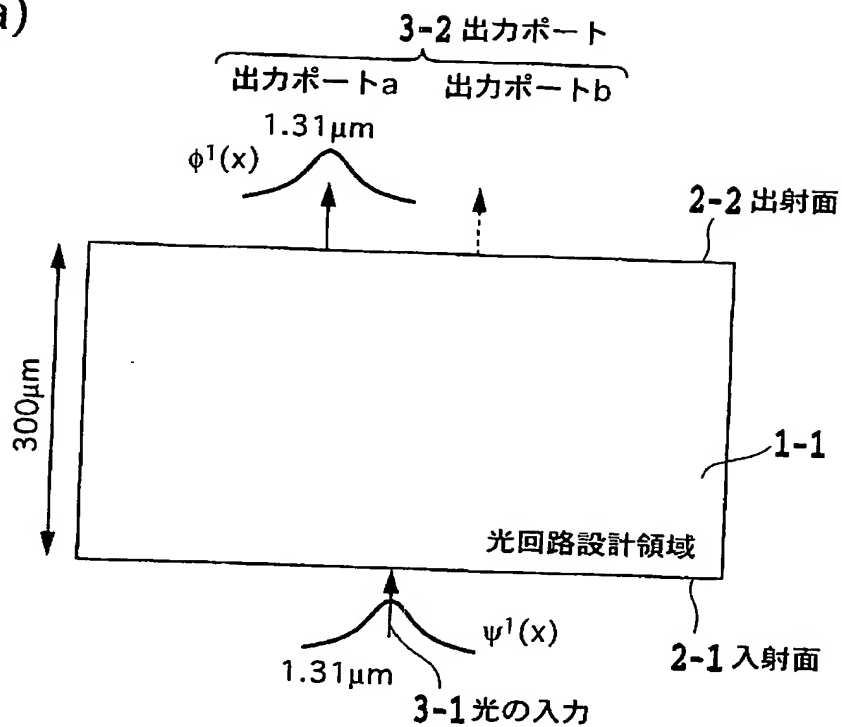
【図 2】



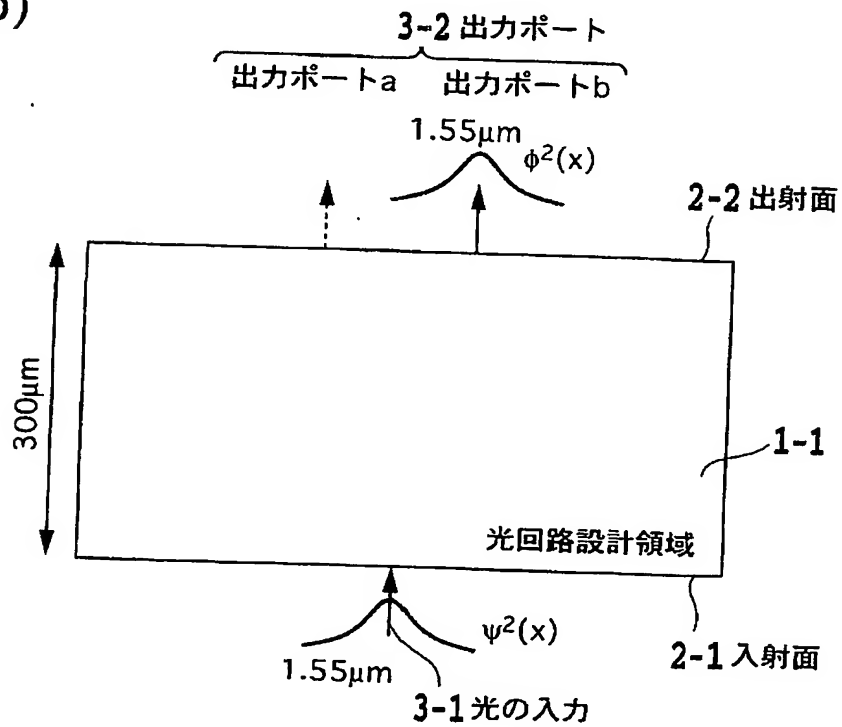
※ “ \leftarrow ” の意味はたとえば
 $A \leftarrow B + C$
 はAにBとCの和を代入することを表す

【図 3】

(a)

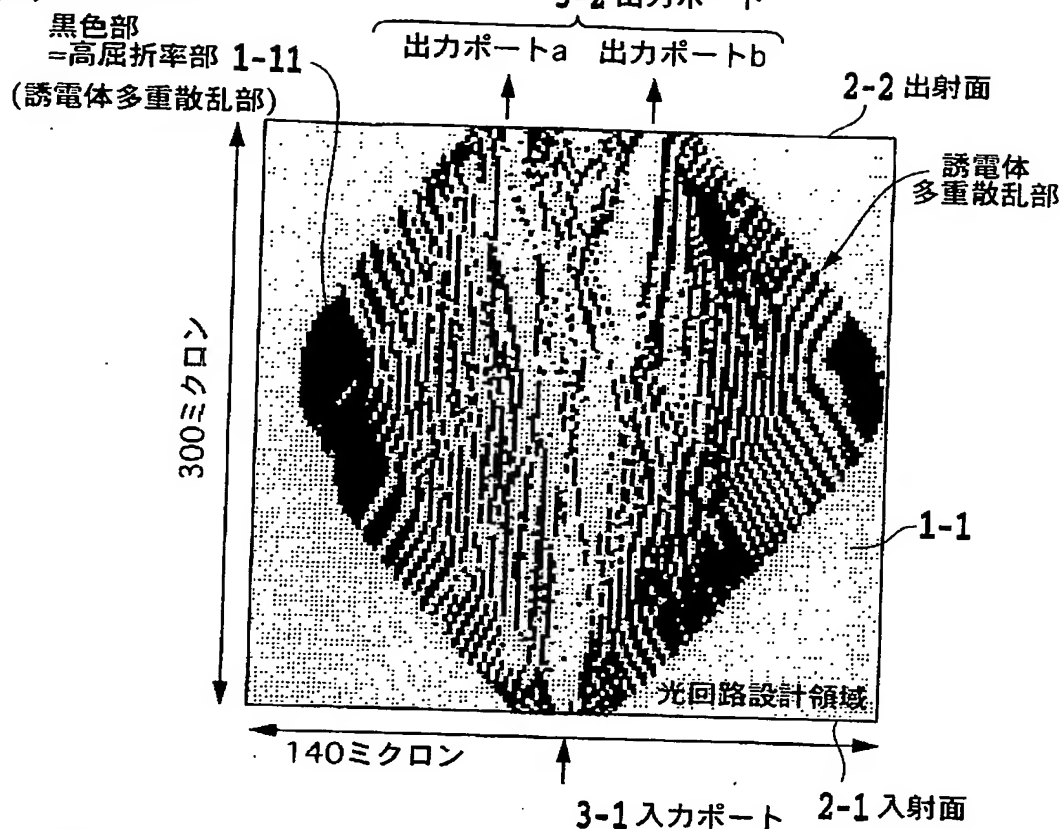


(b)

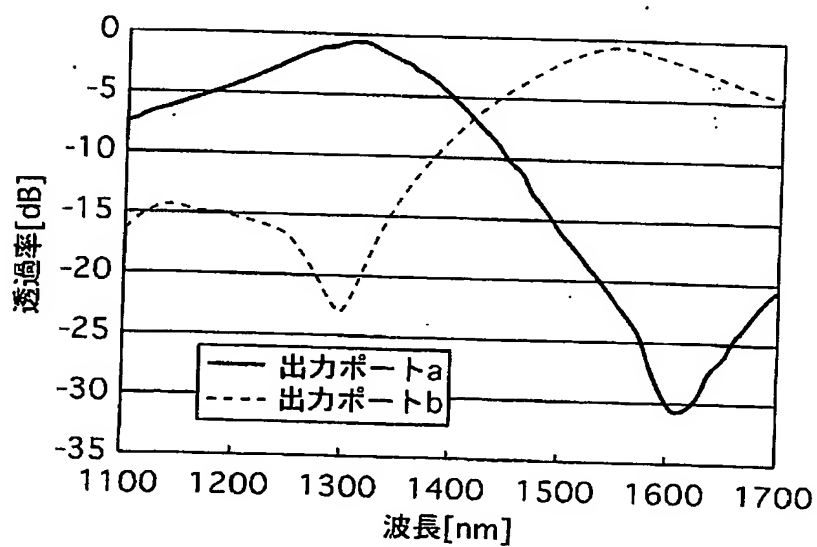


【図 4】

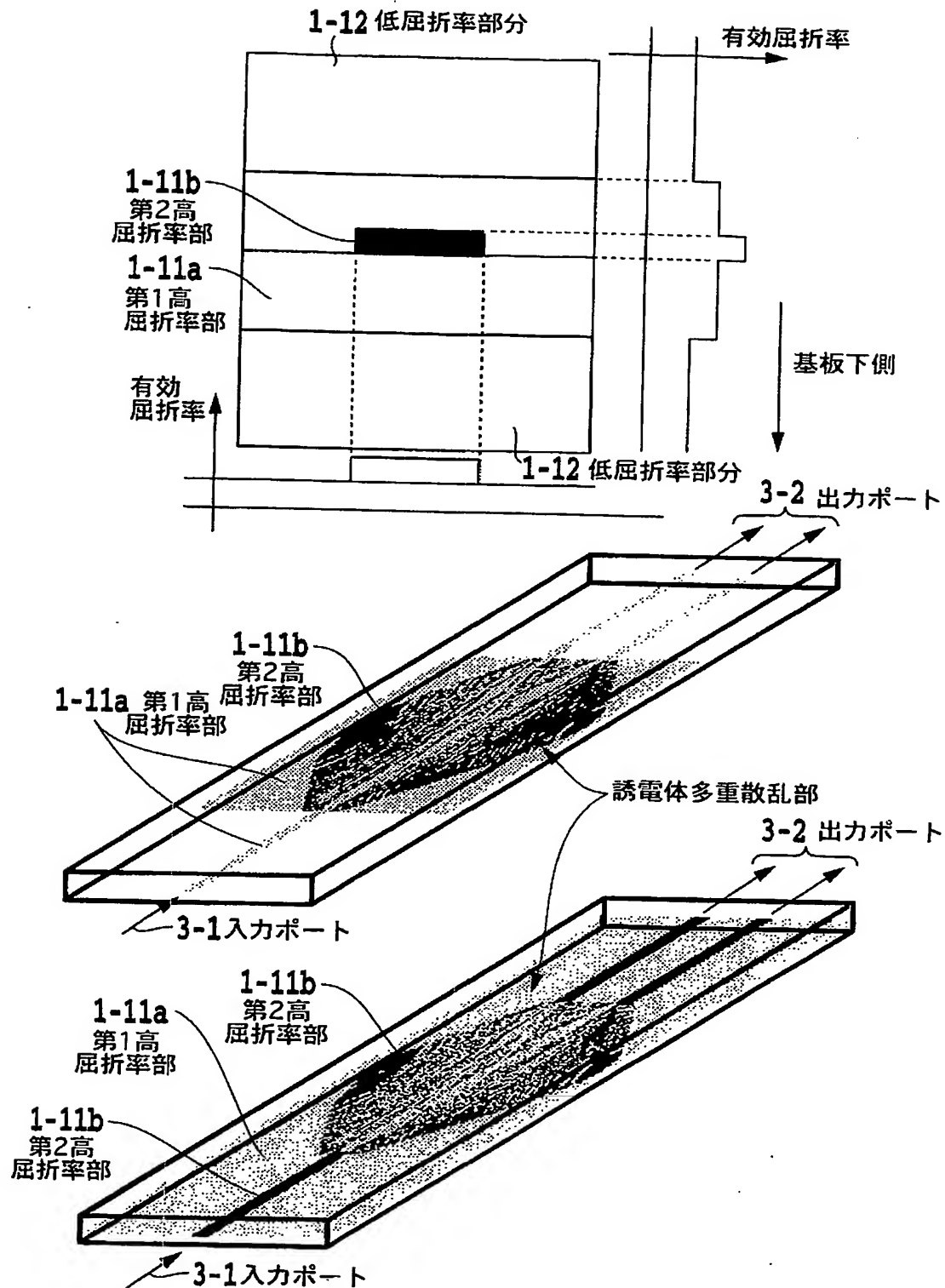
(a) 屈折率分布



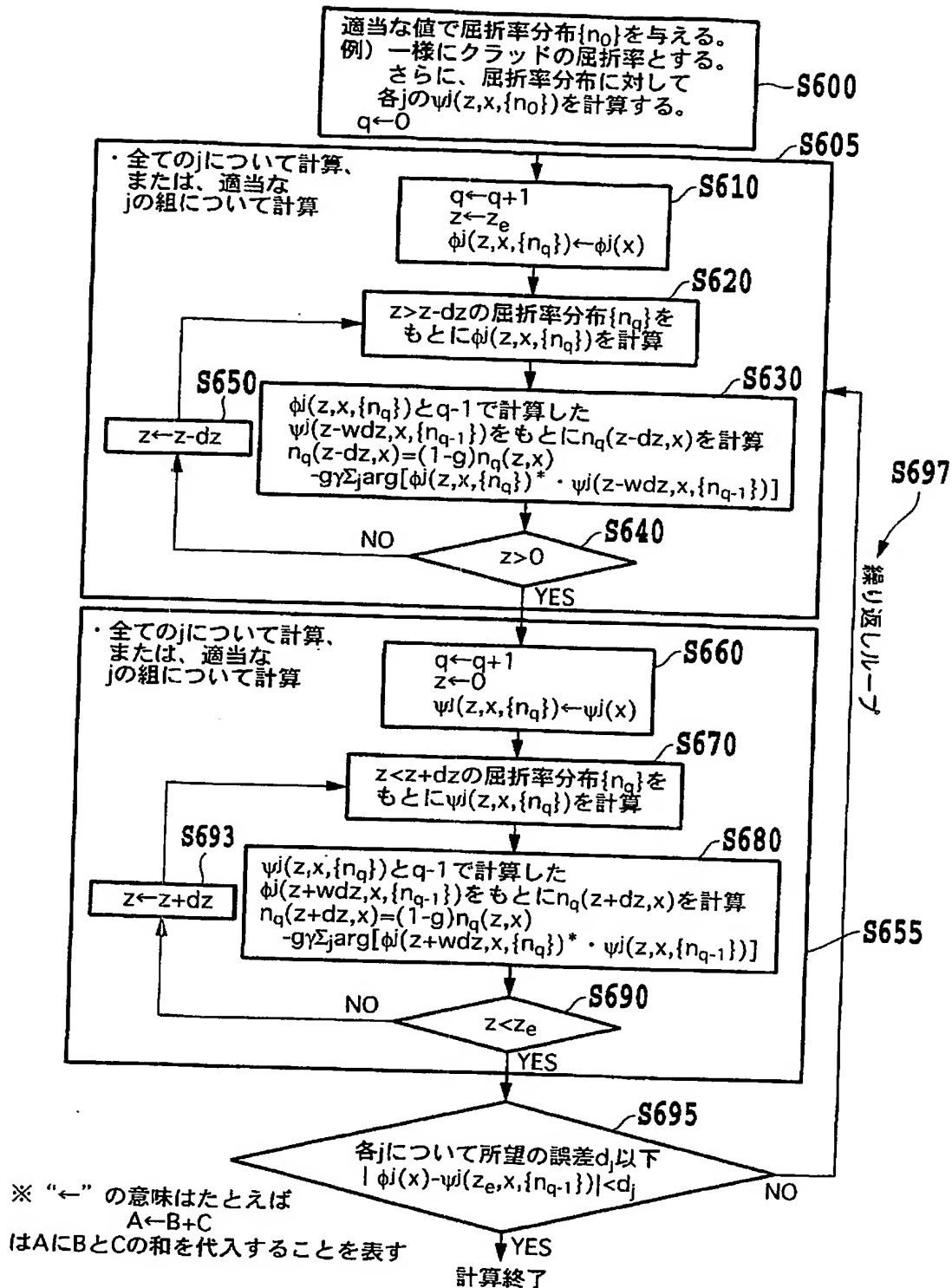
(b) 透過スペクトル



【図 5】

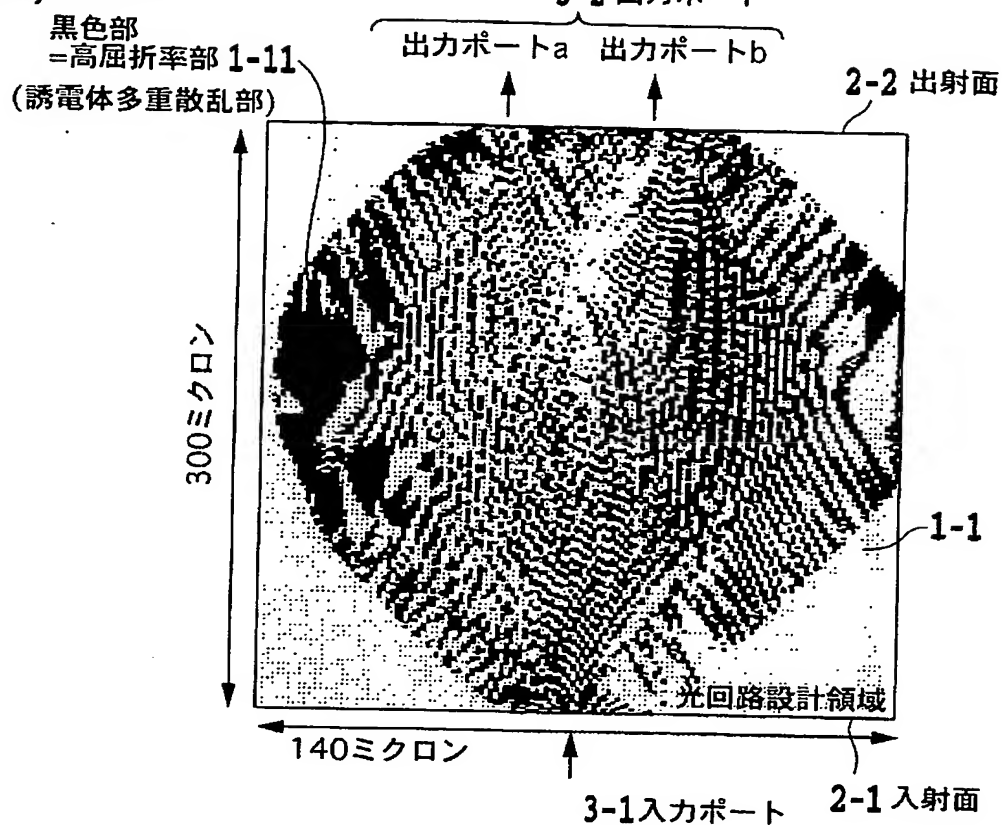


【図 6】

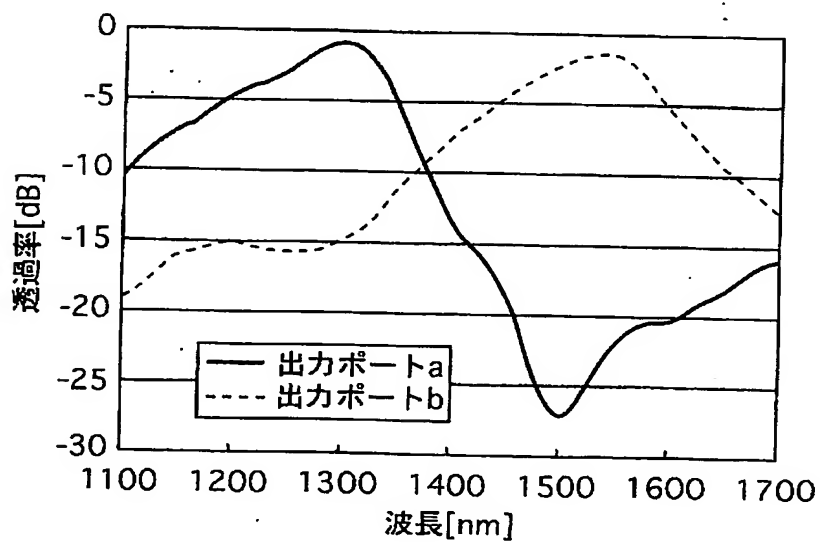


【図7】

(a) 屈折率分布

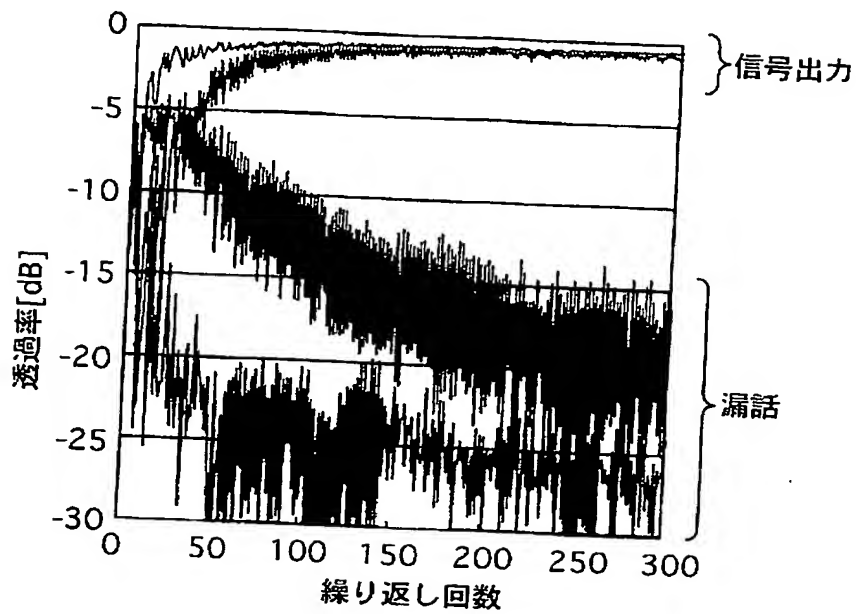


(b) 透過スペクトル

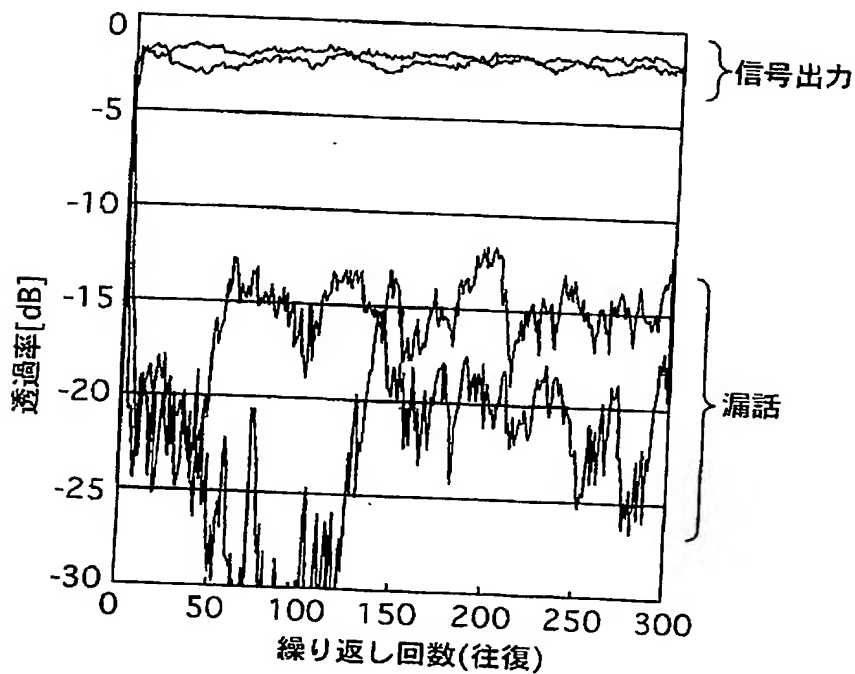


【図8】

(a) 実施形態1の繰り返し回数に対する透過率の変化

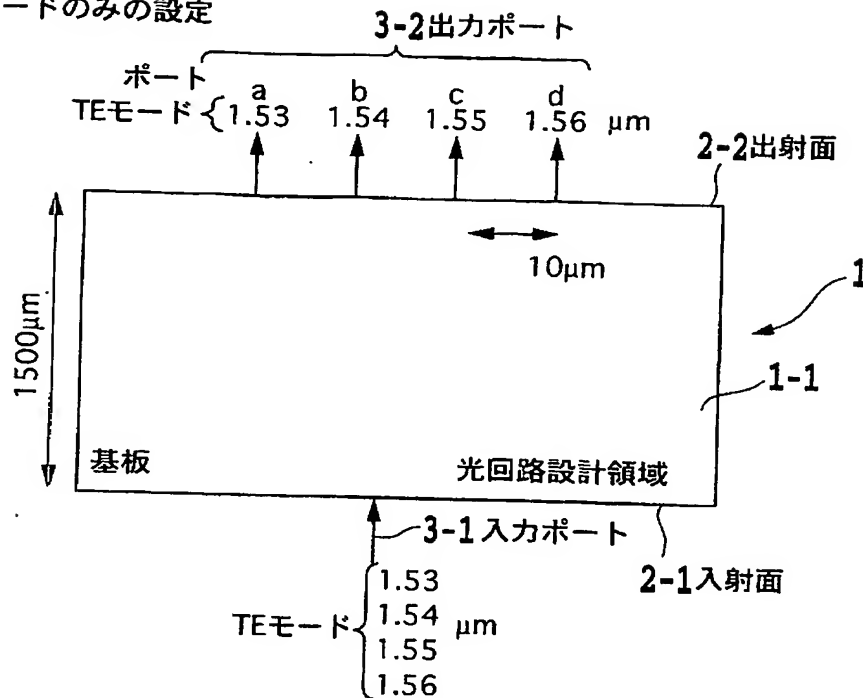


(b) 実施形態2の繰り返し回数に対する透過率の変化

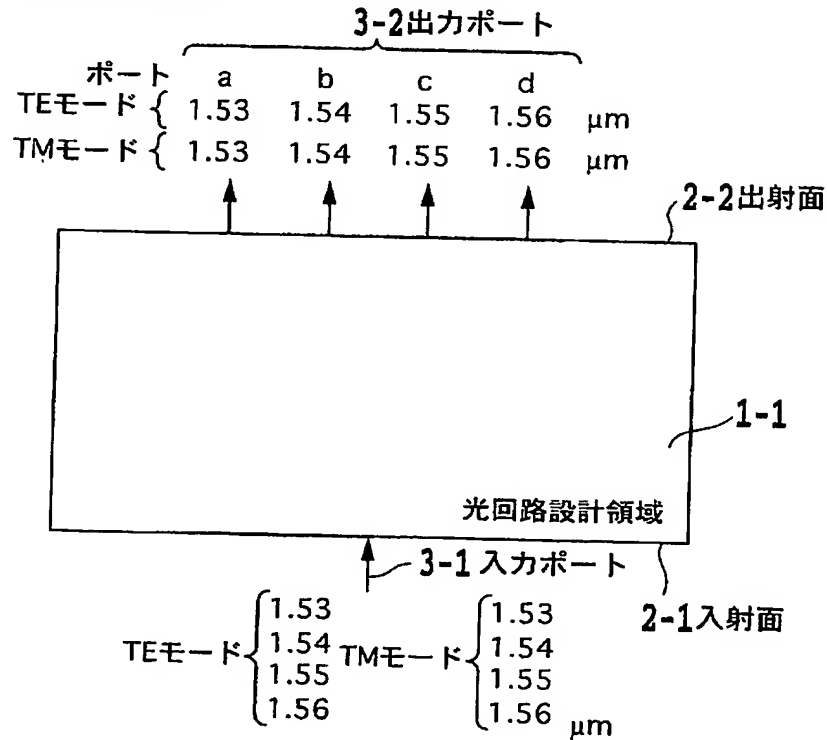


【図 9】

(a) TEモードのみの設定

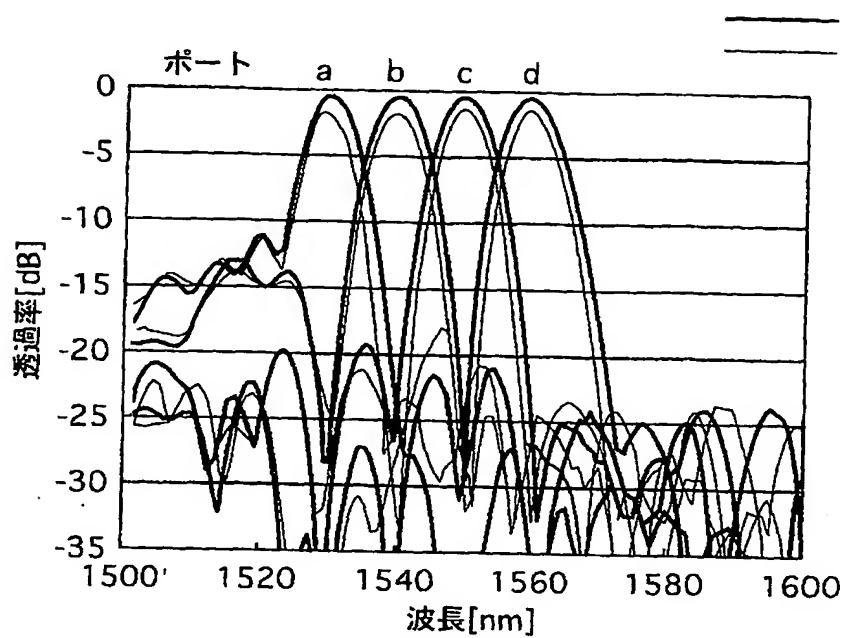


(b) TMモードを加えた設定

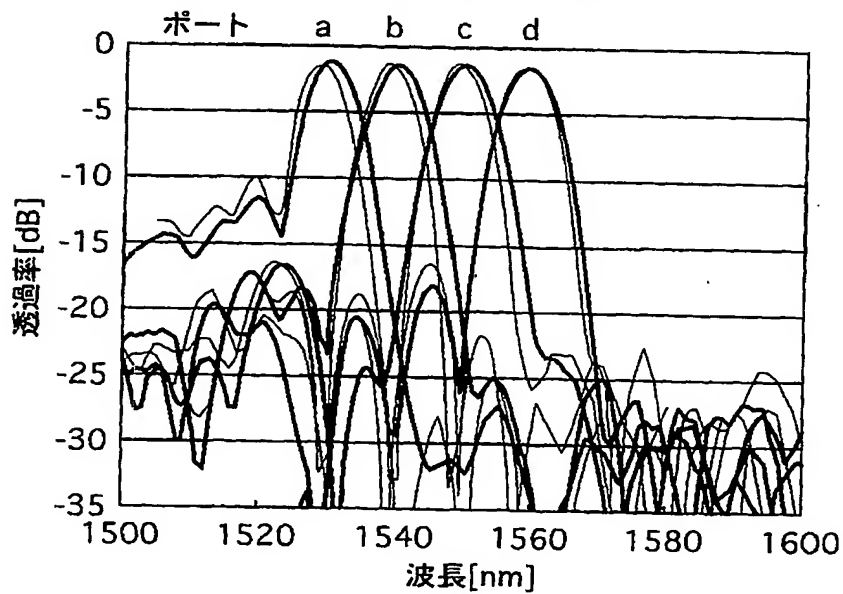


【図10】

(a) TEモードのみで光回路を設計した場合

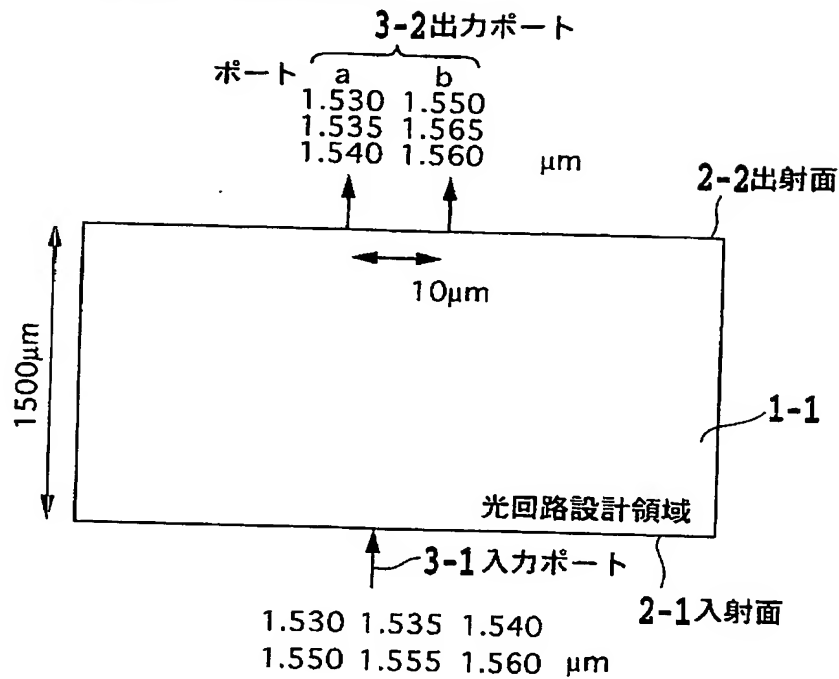


(b) TEモードとTMモードで光回路を設計した場合

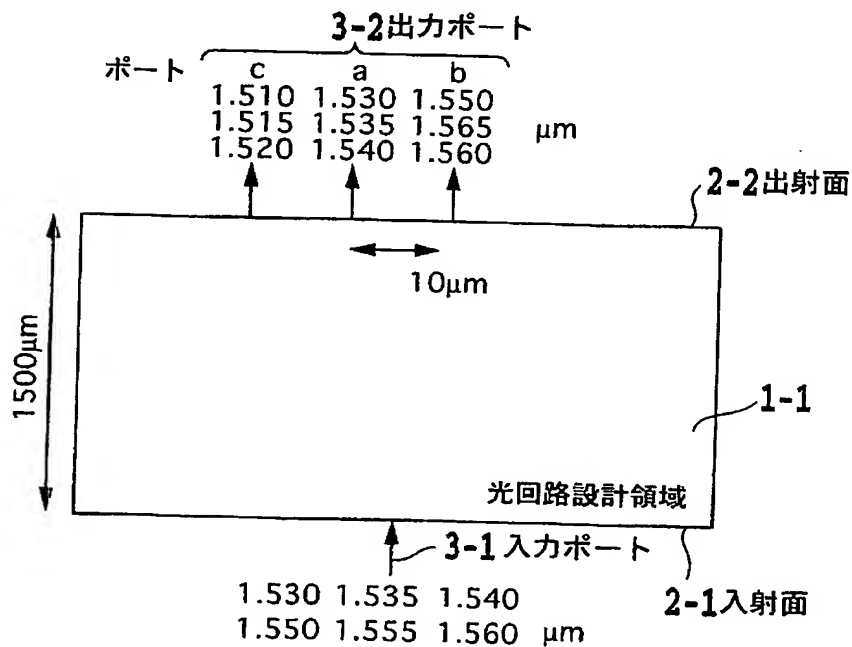


【図 11】

(a) 単純なバンド透過フィルタの設定

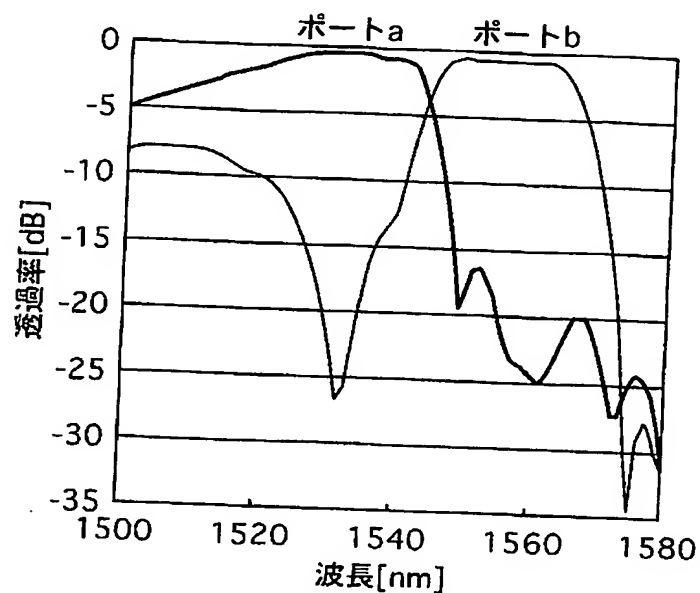


(b) バンドを整形用のダミーポートcを加えた場合

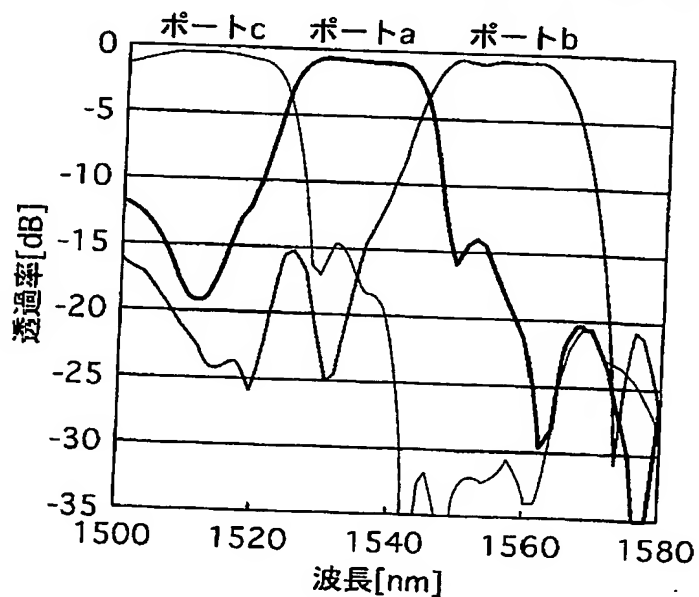


【図12】

(a) 単純な帯域透過フィルタの設定でのスペクトル

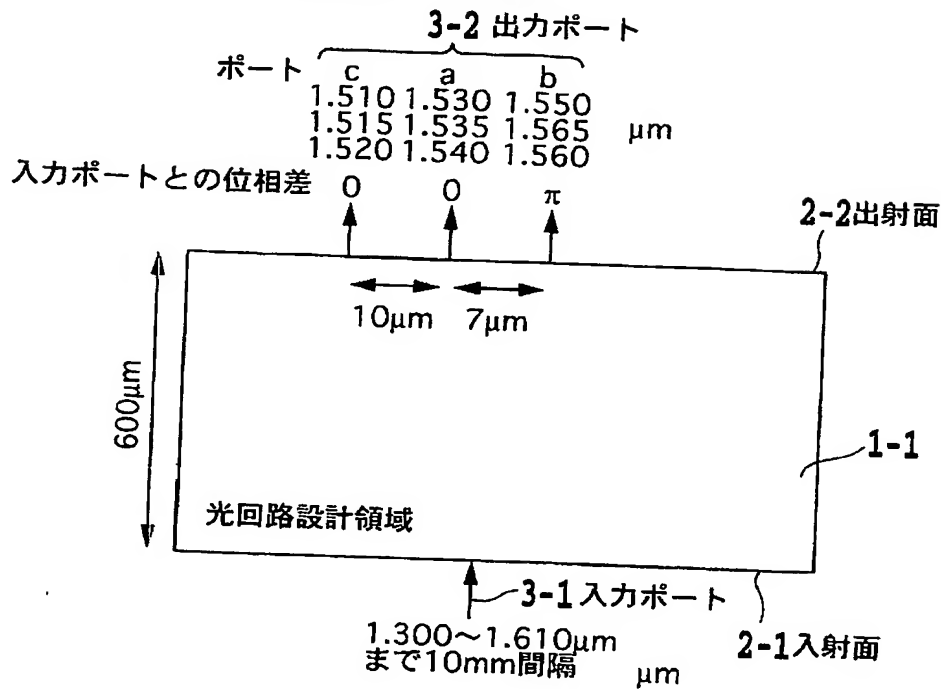


(b) 帯域整形用のダミーポートcを加えた場合の透過スペクトル

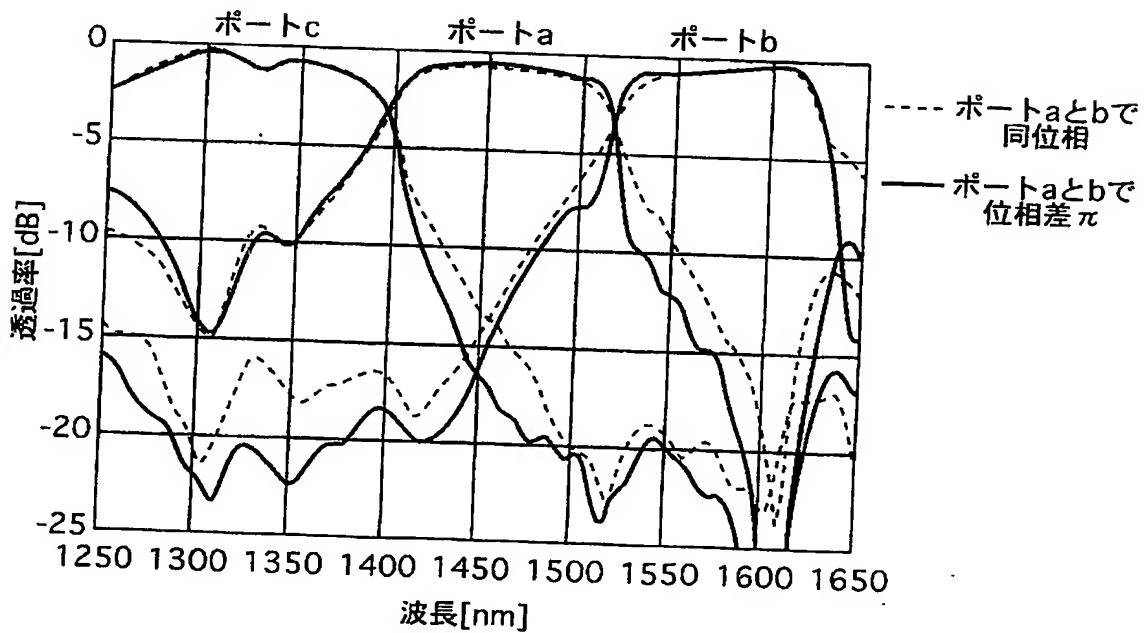


【図 13】

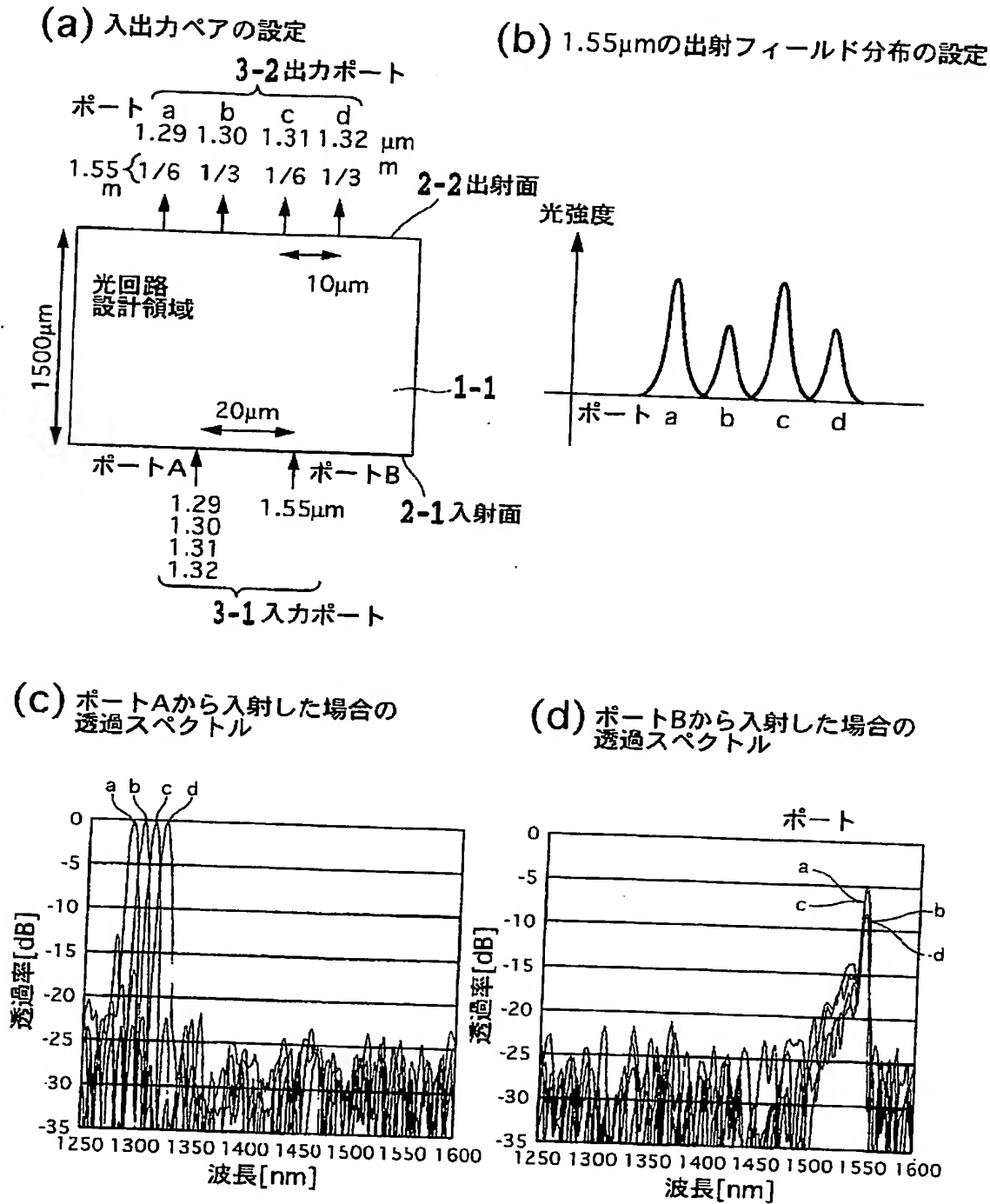
(a) 帯域透過フィルタの出力ポートの設定



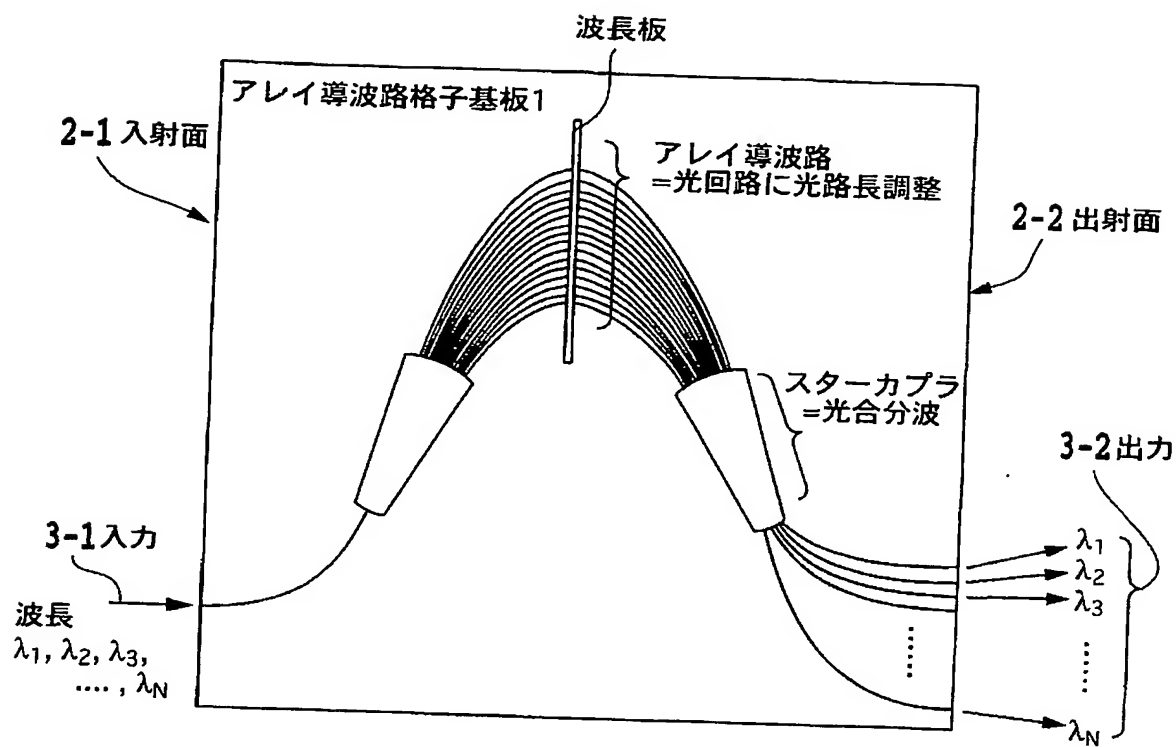
(b) 透過スペクトル



【図14】

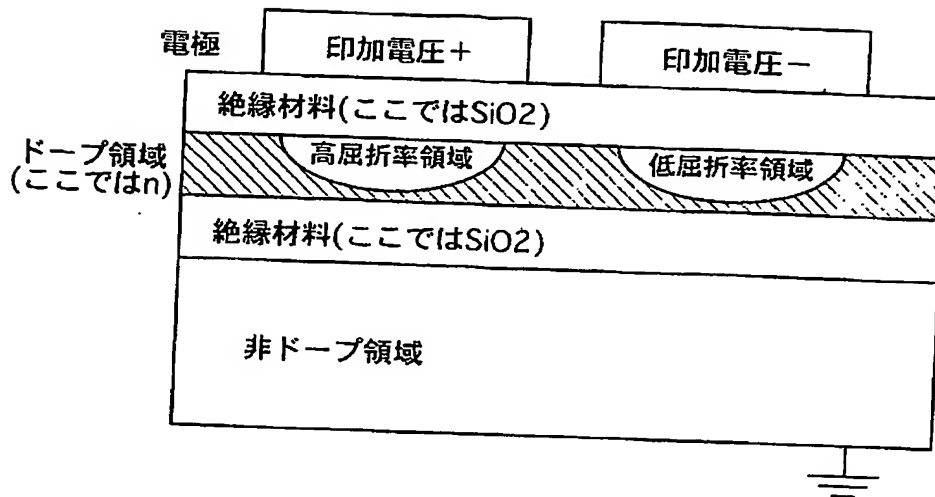


【図 15】

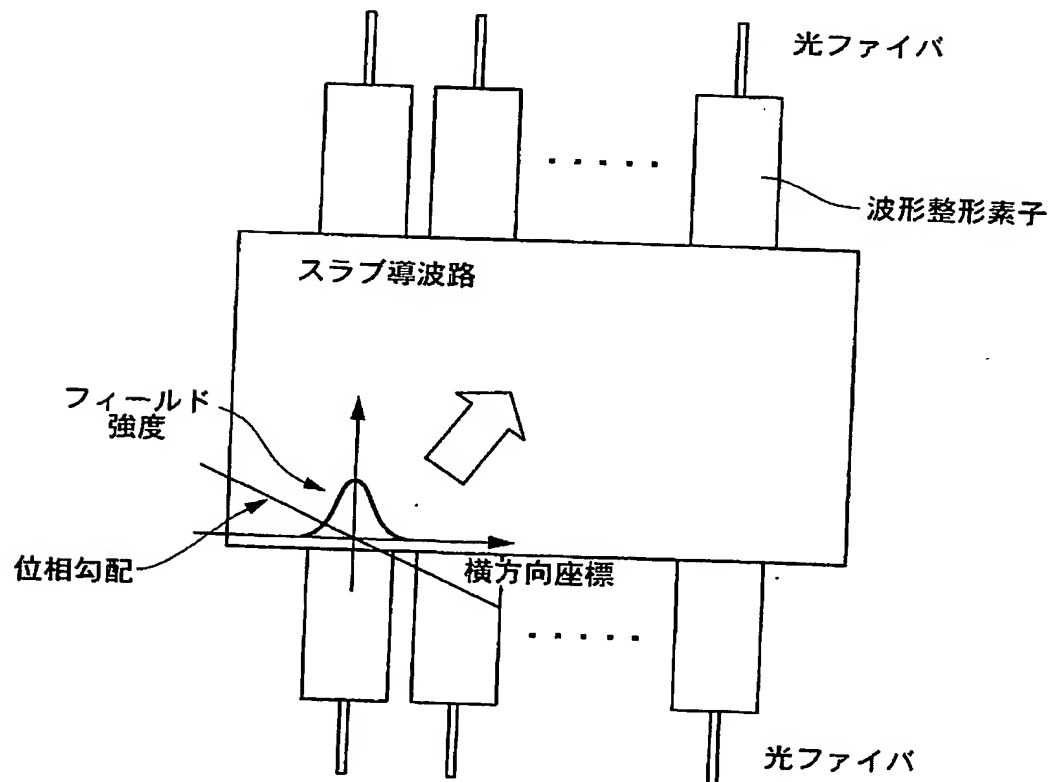


【図 16】

(a)



(b)



【書類名】

要約書

【要約】

【課題】 小型で効率よく光信号を制御できる光回路を製造する。

【解決手段】 誘電体からなり入出力ポートを持ち、光信号を制御し、入力ポートから入射した光を所望の出力ポートに出射させる際、屈折率分布により入出力ポートからの出射光を回折しつつ、複数回の散乱による干渉を用いる光回路の設計方法は、入力ポートから入射した伝搬光のフィールド分布 1（伝搬光）および入力ポートから入射した光信号の期待される出力ポートからの出力フィールドを出力ポート側から逆に伝搬させた光（位相共役）のフィールド分布 2（逆伝搬光）を数値計算により求め（S 2 2 0）、それをもとに、伝搬光と逆伝搬光の各点における位相差を減少させるように、屈折率分布を繰り返し配置して（S 2 4 0）、入力フィールドの伝搬後の出力と所望の出力フィールドが所望の誤差以下となるまで、計算を繰り返す（S 2 3 0）。

【選択図】

図 2

特願 2002-378514

出願人履歴情報

識別番号

[000004226]

1. 変更年月日

1999年 7月15日

[変更理由]

住所変更

住 所

東京都千代田区大手町二丁目3番1号

氏 名

日本電信電話株式会社